



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRÍZ**

**“ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE
MANTENIMIENTO PROACTIVO APLICADO A MOTORES
WÄRTSILÄ 18V32 LN”**

CRIOLLO ROJAS FREDY ROLANDO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO AUTOMOTRÍZ

RIOBAMBA – ECUADOR

2014

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-12-20

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

FREDY ROLANDO CRIOLLO ROJAS

Titulada:

**“ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLAN DE MANTENIMIENTO
PROACTIVO APLICADO A MOTORES WÄRTSILÄ 18V32 LN”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRÍZ

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Telmo Moreno Romero
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Diego Álvarez Lara
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: FREDY ROLANDO CRIOLLO ROJAS

TÍTULO DE LA TESIS: “ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO APLICADO A MOTORES WÄRTSILÄ 18V32 LN”

Fecha de Examinación: 2014-02-21

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Carlos Santillán Mariño PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Telmo Moreno Romero DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Diego Álvarez Lara ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Jorge Paucar Guambo
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Fredy Rolando Criollo Rojas

DEDICATORIA

A mis padres que me supieron dar su apoyo incondicional durante el transcurso de mi carrera profesional.

Fredy Criollo Rojas

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Automotriz, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

A Wärtsilä Ecuador S.A. por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto, enriquecer y aplicar los conocimientos adquiridos en esta investigación.

Fredy Criollo Rojas

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes de la electrónica automotriz	4
2.1.1 Parámetros del motor y condiciones de funcionamiento.	6
2.1.2 <i>Sistemas constitutivos de la unidad.</i>	7
2.2 Disposiciones de seguridad	13
2.3 Perturbaciones en la vida útil del activo	13
2.4 Instrucciones generales.....	14
2.5 Estrategias de mantenimiento	14
2.5.1 <i>Definición de mantenimiento.</i>	14
2.5.2 <i>Gestión del mantenimiento.</i>	15
2.5.3 <i>Modelos de mantenimiento.</i>	16
3. ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO CENTRADO EN LA CONDICIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE	
3.1 Mantenimiento proactivo.....	20
3.1.1 Características del mantenimiento proactivo.....	21
3.1.2 Factores que incurren en el desarrollo de una falla.	21
3.1.3 <i>Tipos de fallas.</i>	22
3.2 Lubricación.....	33
3.2.1 <i>Tipos de lubricación.</i>	33
3.2.2 <i>Aceite lubricante.</i>	41
3.2.3 Características del sistema de lubricación.	34
4. COMPROBACIÓN Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	
4.1 Propiedades físicas del aceite	65
4.2 Análisis espectro-químico	66
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Recomendaciones	70

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1. Uso del equipo de protección personal (EPP) según su aplicación	13
2. Programa de mantenimiento	18
3. Esfuerzos de los aceites lubricantes para máquinas de media velocidad	49
4. Características del sistema de lubricación	34
5. Ducto principal de suministro de aceite a la máquina	36
6. Información general del aceite.....	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema conceptual de detección de degradación	2
Figura 2. Grupo electrógeno <i>Wärtsilä Vasa 32</i>	4
Figura 3. Procesos termodinámicos del ciclo <i>Diesel</i>	5
Figura 4. Representación de factores influyentes sobre el motor	6
Figura 5. Esquema del sistema de lubricación	8
Figura 6. Esquema del sistema de combustible	9
Figura 7. Esquema del sistema de aire comprimido	10
Figura 8. Esquema del sistema de refrigeración	11
Figura 9. Esquema del sistema de aire de carga	12
Figura 10. Esquema del sistema de gases de escape	12
Figura 11. Clasificación de los tipos de stock de repuestos	16
Figura 12. Esquema de la evolución del mantenimiento	16
Figura 13. Curva F-P, evolución y evaluación de una falla	20
Figura 14. Tipos de factores relacionados a una falla.	22
Figura 15. Clasificación de fallas en factores físicos y químicos	23
Figura 16. Curva de <i>Stribeck</i>	33
Figura 17. Esquema del sistema de lubricación	35
Figura 18. Separadora de aceite lubricante del motor	38
Figura 19. Proceso de gestión del análisis de aceite	40
Figura 20. Clasificación de los aceites según sus bases.	42
Figura 21. Principales zonas en la formación de desgaste y contaminación en un motor	43
Figura 22. Apariencia de los asfaltenos (n-c7 y n-c5)	50
Figura 23. Dispersión de la correlación entre el BN y la viscosidad	57
Figura 24. Dispersión de la correlación entre el BN y el Hollín	58
Figura 25. Dispersión de la correlación entre el Vanadio y Níquel	59
Figura 26. Captura del ingreso de la definición del problema	61
Figura 27. Leyenda del gráfico Realitycharting:	61
Figura 28. Vista compacta extraída del Realitycharting de la degradación de las propiedades del aceite	62
Figura 29. Comportamiento del BN en función del tiempo	65

Figura 30. Comportamiento de las partículas de desgaste en función del tiempo	66
Figura 31. Comportamiento de los agentes contaminantes en función del tiempo	67
Figura 32. Clasificación de los petróleos crudos por Factor Watson	68

SIMBOLOGÍA

K	Multiplicidad de circulación del aceite del motor.	s^{-1}
Q_b	Caudal suministrado por la bomba de lubricación.	l/min
V	Volumen del cárter.	L
A	Área de la tubería conductora del flujo de aceite.	m^2
q	Capacidad específica del sistema de lubricación	l/kW
a_b	Suministro específico de la bomba de aceite	l/kWh
Q	Flujo de separación	l/h
BN	Número de basicidad del aceite lubricante (reserva alcalina).	mg KOH/g

LISTA DE ABREVIACIONES

ISO 18436-4	International Organization for Standardization. Field Lubricating Analysis
ISO 4406:99	International Organization for Standardization. Method for coding the level of contamination by solid particles
CIMAC	International Council on Combustion Engines
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American Petroleum Institute

LISTA DE ANEXOS

- A** Especificaciones y parámetros operativos
- B** Análisis de aceite realizado en laboratorio
- C** Reportes de mantenimiento
- D** Análisis de combustible

RESUMEN

El análisis e implementación de un plan de mantenimiento proactivo, tiene como objetivo identificar las principales fuentes de daños dentro del motor *Wärtsilä Vasa 32 LN*, para no incrementar costos de producción y operación. La distribución de las fallas que se pueden presentar en la máquina en función al desgaste permitió centrarse en el lubricante como fuente principal de desgastes en la máquina. Debido a inconvenientes de logística el fundamento del presente estudio se ha basado en gran parte con apoyo de materiales bibliográficos y resultados de laboratorio, para en lo posterior proceder al análisis y comparación del comportamiento del fluido. De esta manera se tomaron muestras del aceite lubricante para identificar y analizar sus propiedades. El procesamiento y análisis de pruebas fueron realizados en base a informes emitidos por un laboratorio, posteriormente los datos fueron analizados utilizando procesos estocásticos y analizando las reacciones químicas en casos específicos donde se requería conocer la reacción de otros componentes como el combustible y agua de refrigeración. Se encontró que el porcentaje de azufre del combustible se encuentra en niveles normales, el agua de refrigeración de la máquina contiene niveles de PH ligeramente por encima de 7 con características alcalinas. Dentro del intervalo de muestreo las propiedades del aceite permanecieron entre sus valores normales sin que puedan representar riesgos para la operación. Esta relación de parámetros nos ayudó a comparar el comportamiento de las características del aceite entre si y a su vez identificar posibles fuentes de contaminación y prolongar el intervalo de cambio de aceite 1000 horas adicionales de operación sin presentar inconvenientes, manteniendo su supervisión.

PALABRAS CLAVE: <ANÁLISIS DE ACEITE>, <FALLAS>, <MANTENIMIENTO PROACTIVO>, <MOTOR WÄRTSILÄ>, <NÚMERO DE BASICIDAD>, >PARADAS NO PROGRAMADAS>, <PROYECCIÓN ESTADÍSTICA>, <REACCIÓN QUÍMICA>.

ABSTRACT

This research is intended to carry out the Analysis and Implementation of a Proactive Maintenance Plan, to identify the main causes of the Wärtsilä Vasa32 LN engine damage to save costs of production and operation as well as to increase the production capacity. The failure or malfunction of this device is mainly associated to the device wear which accounts for lubrication that is the performance of machinery is in close relation with lubrication, therefore this study was focused on the lubrication as the main cause of machinery wear. It must be pointed out that the study fundamentals are theoretically well based, supported by bibliographical sources and, moreover by the lab testing results even though the initial logistic difficulties. Once the lubricant samples were taken and tested to determine the lubricant properties, the report of lab testing results were made in regarding the analysis process and procedures for a further data analysis which was made by using the stochastic process giving account of chemical reactions of other components like combustible and cooling water on specific cases, that is, the sulfur encountered in the combustible is in a level into the norms, and the PH levels of machinery cooling water are lightly over 7 in regarding the alkaline features. Throughout the sampling interval the lubricant properties remained into the norms with no operating risk. This parameter relation allowed to contrast the lubricant feature behavior as well as identify the probable cause of contamination in order to prevent it for lengthening the lubricant-change interval in 1000 additional operating hours without shortcomings by keeping the monitoring.

RESEARCH KEY WORDS: <LUBRICANT ANALYSIS>, <MALFUNCTION/FAILURE>, <PROACTIVE MAINTENANCE>, <WÄRTSILÄ VASA32 LN ENGINE>, <BASICITY NUMBER>, <NO PROGRAMED STOPS>, <STATISTICAL PROJECTION>, <CHEMICAL REACTION>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las máquinas alternativas en términos generales, empezaron como máquinas de vapor aproximadamente 300 años atrás (en el año 1712). La primera fue producida en *Dudley Castle* con una eficiencia térmica de alrededor del 0.5%. Consecuentemente hubo oportunidades para grandes mejoras, y como primer paso, el pistón fue sellado por un paquete de cuerdas, el cual incremento la eficiencia térmica a 1.4% (en el año 1774).

La máquina de combustión interna fue publicada aproximadamente cien años atrás. Esta máquina también trajo varios nuevos componentes en contacto bajo movimiento relativo (HADFIELD, et al., 2003).

La evolución en el diseño de máquinas cada vez más compactas y eficientes ha exigido desarrollar también metodologías aplicadas en el mantenimiento predictivo entre ellas el análisis del aceite lubricante, que nos permiten conocer el estado aproximado de las condiciones operativas de la máquina, se ha logrado programar de mejor manera las acciones que se deben tomar al intervenir las máquinas de combustión interna al ejecutar un mantenimiento así como también evolucionar en el diseño de elementos que brinden una mejor resistencia al desgaste con la ayuda también de la mejora en la calidad de los aceites lubricantes.

1.2 Justificación

El Mantenimiento Proactivo, es una estrategia de mantenimiento, dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria. Una vez que las causas que generan el desgaste han sido localizadas, no debemos permitir que éstas continúen presentes en la máquina.

La longevidad de los componentes del sistema depende de que los parámetros de causas

de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, utilizando una práctica de "detección y corrección" de las desviaciones según el programa de Mantenimiento Proactivo.

En sistemas mecánicos operados bajo la protección de lubricantes líquidos, controlar cinco causas de falla plenamente reconocidas, puede llevar a la prolongación de la vida de los componentes.

Estas cinco causas críticas a controlar son:

- Partículas
- Agua
- Temperatura
- Aire
- Combustible u otros compuestos químicos

Cualquier desviación de los parámetros de las causas de falla anteriores, dará como resultado deterioro del material del componente, seguido de una baja en el desempeño del equipo y finalizando con la pérdida total de los componentes o la funcionalidad del equipo (TRUJILLO, 2002).

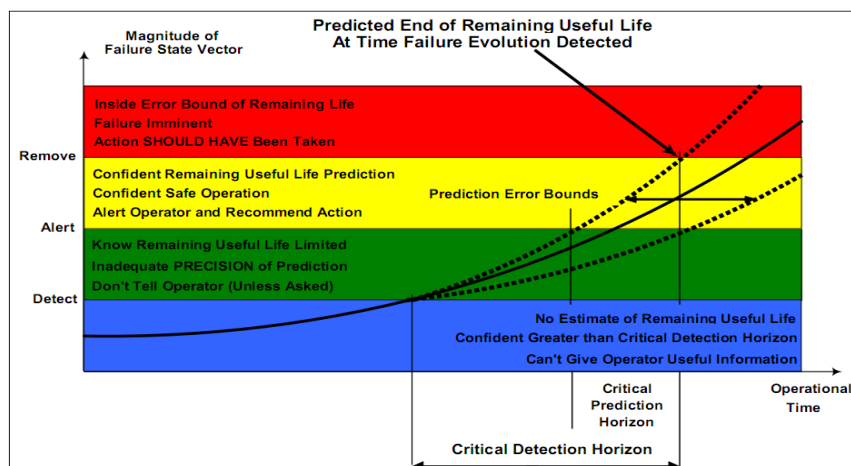


Figura 1. Esquema conceptual de detección de degradación

Fuente: *RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE GUIDE For Facilities and Collateral Equipment, CBM Technology NASA RCM Course 3 - Penn State Applied Research Laboratory*

En la figura anterior, se puede identificar la evolución de una falla, los niveles de detección y la atención que requiere para su corrección.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Realizar e implementar un plan de mantenimiento proactivo aplicado a los motores *Wärtsilä Vasa 32 LN*.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Revisar las funciones del motor, a su vez los ciclos de trabajo y parámetros operativos del mismo.

Resaltar las fortalezas del mantenimiento proactivo sobre las otras metodologías de mantenimiento.

Reconocer los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en el motor.

Calcular parámetros característicos que gobiernan el sistema de lubricación.

Establecer un proceso que facilite la identificación de un requerimiento de un análisis de aceite.

Considerar la importancia de realizar una investigación de la principal causa raíz que afecta la vida útil de la máquina.

Realizar pruebas que nos ayuden a identificar las fuentes de contaminación y degradación en el aceite lubricante, permitiéndonos conocer la condición del mismo para la operación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la electrónica automotriz

Un grupo electrógeno es aquel que es capaz de transformar la energía química del combustible en trabajo mecánico para producir energía eléctrica generada por un alternador acoplado a la máquina de combustión interna.

El motor *Wärtsilä* 18V32 LN es un motor de combustión interna de “media velocidad”, ya que su velocidad operativa está alrededor de las 720 r.p.m. el modelo mencionado posee la característica de trabajar mediante el proceso de oxidación de petróleo crudo, *Heavy Fuel Oil* o con *Light Fuel Oil (Diesel)* según los requerimientos de operación solicitados. Estos motores están diseñados para operar en condiciones iniciales con una producción aproximada de hasta 6,6 MW para la versión 18V32.



Figura 2. Grupo electrógeno *Wärtsilä Vasa 32*

Fuente: *Wärtsilä*.

El ciclo de trabajo del motor está regido por el ciclo *Diesel*, y comprende los procesos termodinámicos mostrados en la Figura 3:

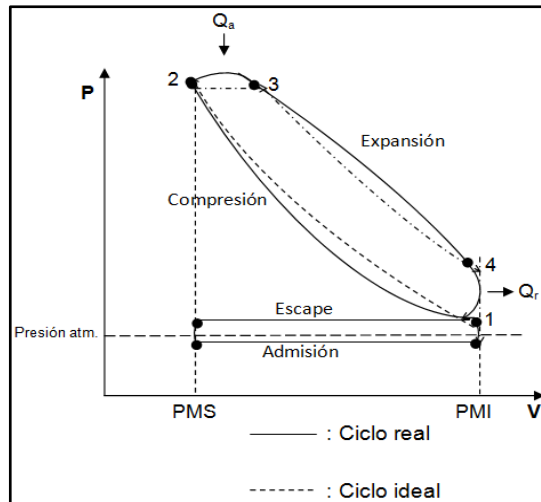


Figura 3. Procesos termodinámicos del ciclo *Diesel*
Fuente: TERMODINÁMICA AUTOMOTRIZ, Ing. Rodrigo F. Díaz B.

Descripción de los procesos:

1-2: Compresión adiabática (entropía constante)

2-3: Aportación de calor (presión constante)

3-4: Expansión adiabática (entropía constante)

4-1: Refrigeración (volumen constante)

Características del ciclo real. En la línea continua del diagrama anteriormente ilustrado se ve el ciclo real, el cual se ve alterado del ciclo real debido a parámetros normales de funcionamiento como:

- Condiciones ambientales
- Sobrealimentación
- Relación aire-combustible
- Duración de la inyección
- Tiempo de adelanto de la inyección

- Factores operacionales como: temperatura y presión de agua de refrigeración, aceite lubricante y combustible
- Tiempo de servicio de la máquina.
- Desgaste y deformaciones presente en componentes del motor, tales como: camisas, rines de pistón, cojinetes, árbol de levas, cigüeñal, etc.

2.1.1 Parámetros del motor y condiciones de funcionamiento. Los parámetros del motor rigen el contexto operacional por ende es la parte vital del activo ya que mediante estos se controla el correcto funcionamiento, mantenibilidad y/o sintomatología de una falla. Los datos operativos del motor se encuentran citados por el manual del fabricante específico para cada planta, e indican los valores adecuados para la operación de la máquina. En la Figura 4 se representa la interacción de los parámetros dentro del motor.

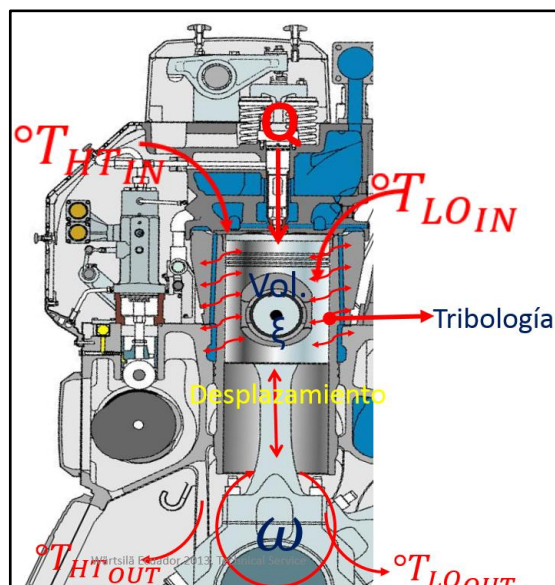


Figura 4. Representación de factores influyentes sobre el motor
Fuente: Wärtsilä, Editado por Autor

Los parámetros referenciales del motor son tomados en base a pruebas realizadas por el fabricante bajo condiciones estándares, es decir:

- Presión de aire= 1.0 bar
- Temperatura ambiente= 25°C

- Humedad relativa del aire= 30%
- Agua refrigerante del enfriador de aire de carga= 25°C

En el Anexo A, se muestran los datos obtenidos de las especificaciones del motor.

2.1.2 *Sistemas constitutivos de la unidad.* La unidad posee sistemas que cumplen funciones específicas que brindan las condiciones necesarias para el desempeño operativo de la máquina. Entre los sistemas se encuentran:

- *Sistema de lubricación.* El sistema de lubricación desempeña la función de disminuir el desgaste y la corrosión dentro del motor. Entre las características que debe cumplir el sistema de lubricación son:

Refrigeración de componentes donde el acceso al agua de refrigeración sea crítico. La temperatura de operación está controlada por un sistema de válvula termostática, módulo de tuberías y un intercambiador de calor.

Reducir la fricción que es producida entre dos superficies en contacto. Produciendo una película de aceite lubricante entre las mismas para evitar en contacto directo y así disminuir el desgaste. El aceite que circula por la máquina es impulsado por una bomba de engranajes acoplada por piñones al cigüeñal.

Limpieza de material residual como: partículas de desgaste producido por la fricción y la contaminación con agua. Por lo que el sistema cuenta con: separadora centrífuga de aceite, filtros finos, filtros centrífugos y calentadores.

El aceite lubricante es capaz de **prevenir corrosión**, gracias a su origen, proceso de fabricación y aditivos que posee.

Estanqueidad entre componentes, como: aros de pistón y pared de cilindros.

El motor dispone de una unidad de pre-lubricación que es accionada por un motor eléctrico para casos de arranque en frío (WÄRTSILÄ DIESEL).

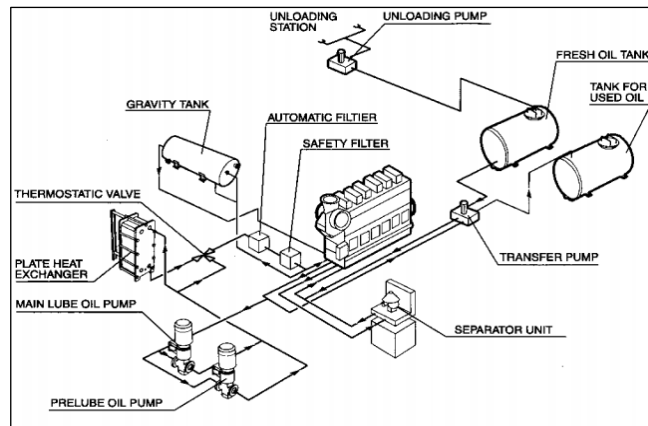


Figura 5. Esquema del sistema de lubricación

Fuente: Power Plants, Handbook for Mechanical Systems, WÄRTSILÄ DIESEL.

- *Sistema de combustible.* El motor Wärtsilä Vasa 32 está diseñado para operación continua con petróleo crudo o diésel. Para este caso la planta de generación cuenta con petróleo crudo como fuente principal de energía, y un combustible liviano alternativo para uso de emergencias y situaciones de mantenimiento. El inconveniente que puede dar lugar a cabo el operar con combustible diésel por un periodo prolongado es debido a las diferentes densidades entre ambos combustibles, es decir los espacios a los cuales se adapta el sistema durante la operación con crudo no pueden ser cubiertos en su totalidad por las moléculas del diésel pudiendo dar lugar a incrementos de fugas en el sistema.

Tabla 1. Diferencia de densidades entre el petróleo crudo y el diésel.

	Petroleo Crudo	Diesel
densidad	0.87 a 0.885 g/cm ³	0.85 g/cm ³

La clasificación de los petróleos crudos se distribuye dependiendo de:

El tipo de hidrocarburo, según su porcentaje prevaleciente, pudiendo clasificarse en:

- Petróleos parafínicos
- Petróleos nafténicos
- Petróleos alfalténicos o aromáticos

Según su grado API, clasificándose en:

Pesados. Inferiores a 22.3° API.

Intermedio. Entre 22.3 a 31.1° API

Livianos. Superiores a 31.1° API

De acuerdo con el reporte de laboratorio el grado API del crudo analizado se encuentra entre 28.3 a 31.5 (ASTM D1298), clasificándolo como un crudo en el rango intermedio-liviano.

En función de su contenido de azufre:

Bajo contenido de azufre

Alto contenido de azufre (Composition and classification of crude oil, 2007).

Contenido de Azufre en el presente análisis es bajo entre 0,66 a 0,89 g%.

El sistema de combustible puede ser dividido en tres partes diferentes:

- Descarga, almacenamiento y sistema de transferencia
- Sistema de tratamiento
- Sistema de alimentación y sistema de recolección (WÄRTSILÄ DIESEL)

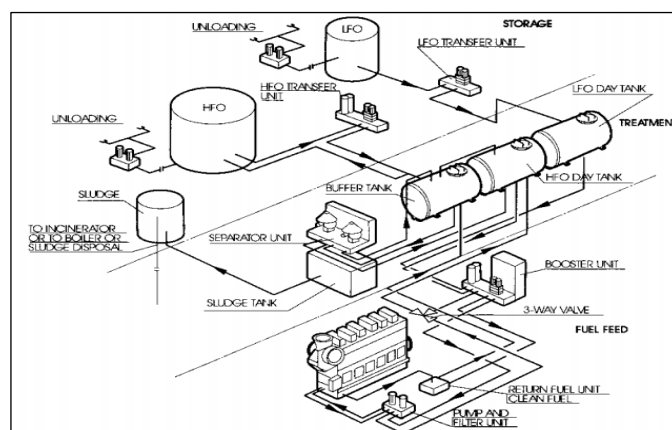


Figura 6. Esquema del sistema de combustible

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems*, WÄRTSILÄ DIESEL

- *Sistema de aire comprimido.* El aire comprimido es necesario en la planta de generación para el arranque de las máquinas, como aire de control e instrumentación y también como aire de trabajo para las herramientas, pistolas de aire comprimido, etc. (ver Figura 7).

La cantidad requerida de aire comprimido es producida en la unidad de aire de arranque y en la unidad de aire de control e instrumentación.

Las dos unidades pueden estar interconectadas permitiendo a la unidad de aire de arranque, en caso de falla en la unidad de aire de control e instrumentación, entregar así aire al equipo de control e instrumentación.

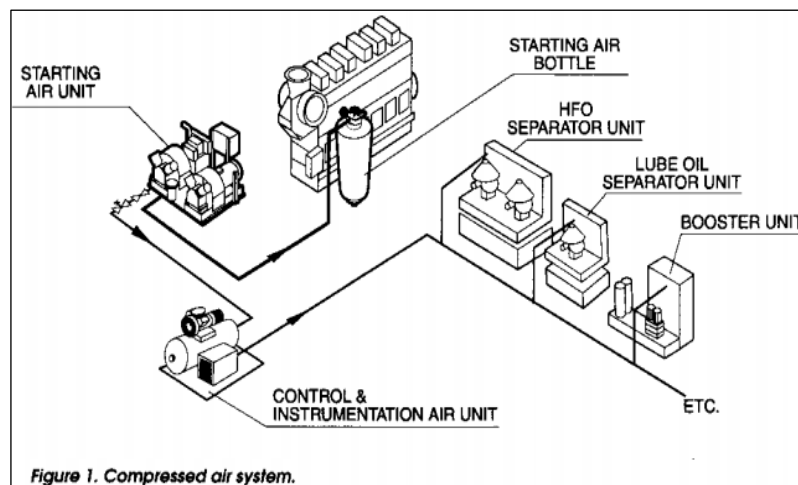


Figura 7. Esquema del sistema de aire comprimido

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems, WÄRTSILÄ DIESEL*

Las principales diferencias entre las unidades son la presión nominal y la calidad de aire entregado.

La unidad de aire de arranque produce aire comprimido a una presión nominal de 30 bares purificado por medio de un separador de aceite y agua.

La presión nominal de las unidades de aire de control e instrumentación es 7 bares. El aire es secado a un punto de rocío de +3°C... +4°C y partículas por debajo de 0,1 micrones son removidas por medio de un filtro. (WÄRTSILÄ DIESEL)

- *Sistema de agua de refrigeración.* El calor transferido al agua de enfriamiento en la máquina debe ser enfriado por los radiadores. El sistema de agua de enfriamiento está dividido en un circuito primario y un circuito secundario. El agua en el circuito primario refrigera la máquina. El circuito primario está dividido en un circuito de temperatura baja (LT) y un circuito de temperatura alta (HT).

En el circuito de LT el exceso de calor del aceite de lubricación y aire de carga es transferido al circuito de agua de refrigeración de temperatura baja, (ver Figura 8). (WÄRTSILÄ DIESEL)

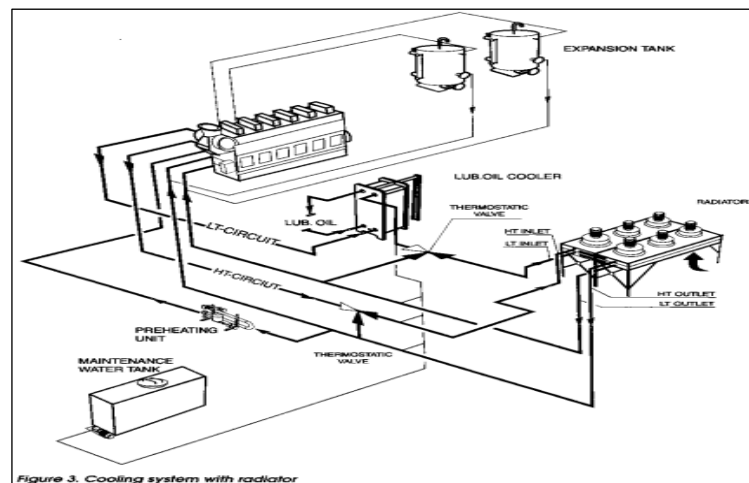


Figure 3. Cooling system with radiator

Figura 8. Esquema del sistema de refrigeración

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems*, WÄRTSILÄ DIESEL

- *Sistema de aire de carga.* La función principal del sistema externo de aire de carga es proveer a la máquina con un adecuado suministro de aire limpio y seco. El aire de combustión (aire de carga) es tomado desde el exterior de la casa de máquinas hacia el motor.

Los principales componentes de un sistema son (ver Figura 9):

- Filtro de aire de carga
- Silenciador de aire de carga
- Sistema de tubería con soportes (WÄRTSILÄ DIESEL)

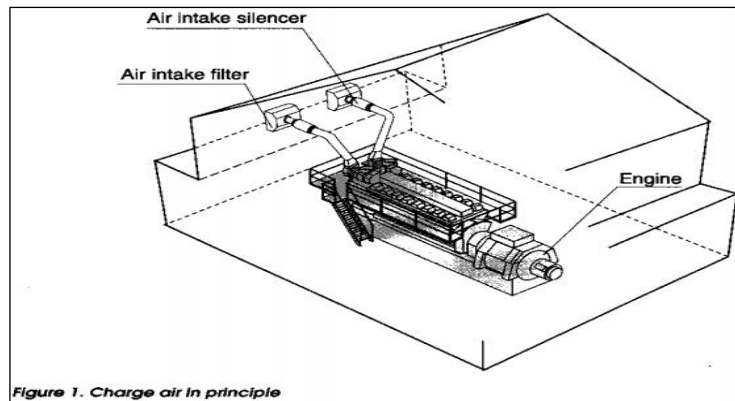


Figura 9. Esquema del sistema de aire de carga

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems, WÄRTSILÄ DIESEL.*

El sistema de aire de carga cumple un rol importante en el rendimiento de la máquina en función de las condiciones ambientales, por tal razón los parámetros medidos en condiciones normales son ajustados de acuerdo a la norma ISO 3046.

- *Sistema de gases de escape.* La principal función del sistema externo de gases de escape es conducir los gases de escape hacia afuera de la planta de generación. El nivel de emisiones y ruido en los alrededores deben estar por debajo de los valores especificados que son establecidos por las autoridades locales., (ver Figura 10).

Algunas veces es suficiente con una chimenea después del silenciador para obtener los requerimientos de emisiones (WÄRTSILÄ DIESEL).

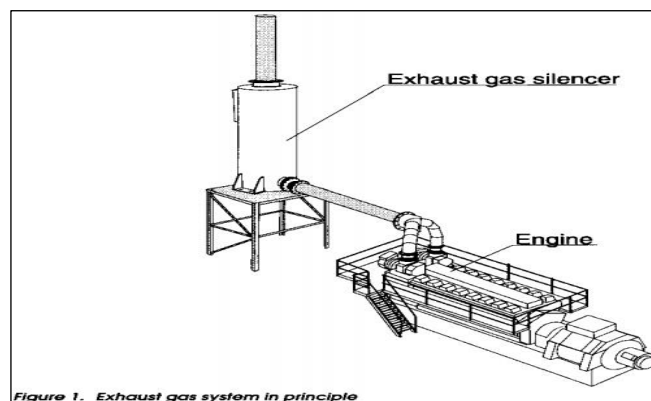


Figura 10. Esquema del sistema de gases de escape

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems, WÄRTSILÄ DIESEL.*

2.2 Disposiciones de seguridad

La seguridad durante la producción depende del estado operativo del activo y de las maniobras realizadas durante la operación y el mantenimiento, por lo cual se debe tomar en cuenta las condiciones necesarias para que la máquina realice su función de manera deseada. Para obtener una visión más clara de la seguridad del activo, se relaciona la misma en función de la actividad a desarrollar, clasificándolas en: actividades de mantenimiento y actividades de operación. Para ambas actividades se debe mantener la seguridad personal ilustrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Uso del equipo de protección personal (EPP) según su aplicación

Parte del cuerpo a proteger	Riesgo	Equipo a utilizar
Cabeza	Caída de objetos, impacto	Casco
Ojos y cara	Proyección de partículas sólidas o derrame de líquidos o gases	Gafas, mascarillas faciales
Nariz	Inhalación de gases	Mascarillas anti polvo, antigases
Pies	Caída de objetos, impacto, corte	Calzado de seguridad (zapatos punta de acero, dieléctricos, etc.)
Manos	Elevadas temperaturas, contacto de líquidos tóxicos, dieléctricos.	Guantes de cuero, nitrilo, tela, etc.
Oídos	Ruido	Tapones, orejeras
General	Contaminación de la piel	Overol, mandiles, etc.

Fuente: Autor

2.3 Perturbaciones en la vida útil del activo

Los elementos sometidos constantemente bajo cargas normales o anormales de trabajo presentan diversas fallas, las cuales están relacionadas con los tiempos de trabajo, intensidad de la carga a la que trabajan, las condiciones operacionales y sus parámetros; siempre llegan a un punto en el cual sus propiedades se pueden ver alteradas, por ende

sus funciones para las cuales fueron diseñados se ven afectadas derivando así en perturbaciones normales de los ciclos de funcionamiento de un sistema. Este tipo de alteraciones pueden o no, notarse de forma significativa posiblemente hasta que lleguen a su punto máximo de esfuerzo o ruptura.

2.4 Instrucciones generales

Para mantener el contexto operacional de la máquina en sus valores óptimos es imprescindible manejarse con las instrucciones del manual de cada equipo ya que en el constan los procedimientos y las medidas necesarias para cada acción y parámetro de funcionamiento.

2.5 Estrategias de mantenimiento

2.5.1 Definición de mantenimiento. Se entiende por mantenimiento a la función empresarial a la que se encomienda el control del estado de las instalaciones de todo tipo, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios. En ese sentido se puede decir que el mantenimiento es el conjunto de acciones necesarias para conservar o restablecer un sistema en un estado que permita garantizar su funcionamiento a un coste mínimo.

Son misiones de mantenimiento:

- La vigilancia permanente y/o periódica
- Las acciones preventivas
- Las acciones correctivas
- El reemplazamiento de la maquinaria (LÓPEZ PÉREZ, 2013)

2.5.2 Gestión del mantenimiento. Dentro de la gestión del mantenimiento se mantiene una organización establecida, que ayuda a llevar la administración en cada procedimiento en relación a cada función, es por ello que cada departamento cumple con sus funciones específicas, sin perder la conexión en cadena para cada requerimiento.

2.5.2.1 Planificación del mantenimiento. Para llevar a cabo los trabajos de mantenimiento es importante elaborar un cronograma de actividades. En esta fase se involucra los factores: tiempo de ejecución para cada actividad, repuestos, número de personal involucrado, insumos y logística. Una de las herramientas que se utiliza para la programación de actividades es Microsoft® Project, en el cual se distribuyen las actividades para tiempos determinados.

2.5.2.1.1 Repuestos. El almacenamiento de repuestos se debe realizar tanto en la planta, teniendo un control de flujo básico, con repuestos de mayor rotación, y también se debe contar con el almacenamiento en bodega en el centro de operaciones, donde se cuenta con un stock convenientemente más amplio. Sobre el manejo de repuestos se debe tomar en consideración los siguientes aspectos:

Para establecer los criterios de repuestos en stock se considera:

- La criticidad de la máquina
- El tipo de pieza (si es o no de desgaste seguro, si es posible repararla, etc.)
- Las dificultades de aprovisionamiento (si el plazo de entrega es o no pequeño)

Se facilita la gestión clasificando el stock en varios tipos de inventarios:

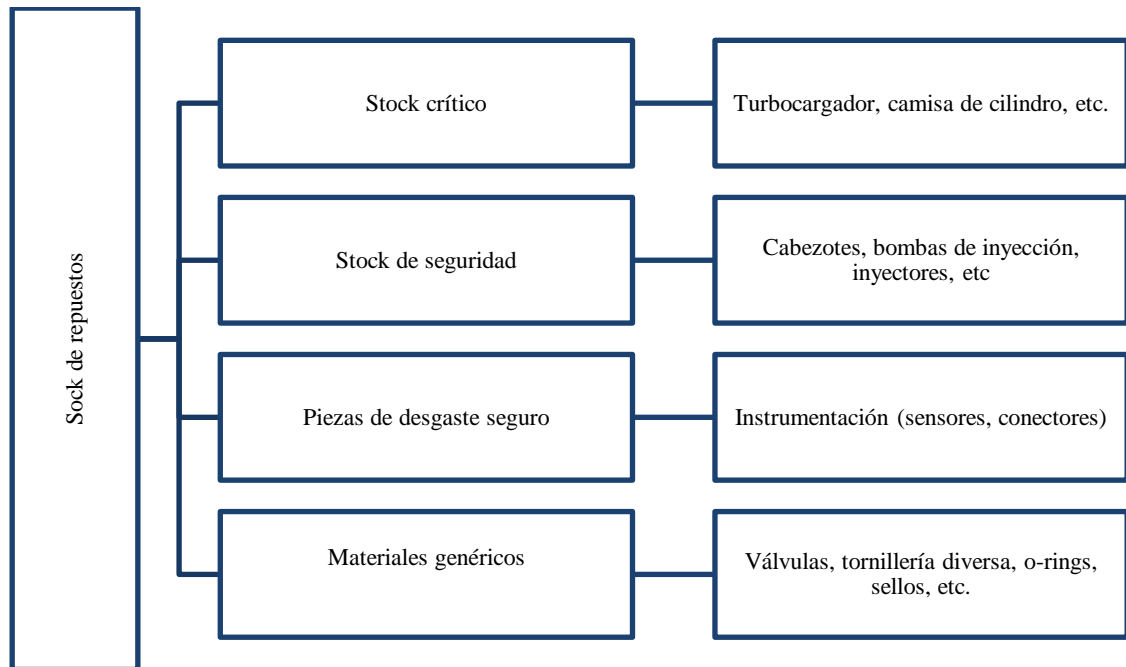


Figura 11. Clasificación de los tipos de stock de repuestos

2.5.3 Modelos de mantenimiento. Los modelos y las técnicas de mantenimiento han evolucionado gracias a las experiencias y estudios que se han obtenido con el paso de los años, en la Figura 11 se observa un esquema de la evolución de las metodologías de mantenimiento.

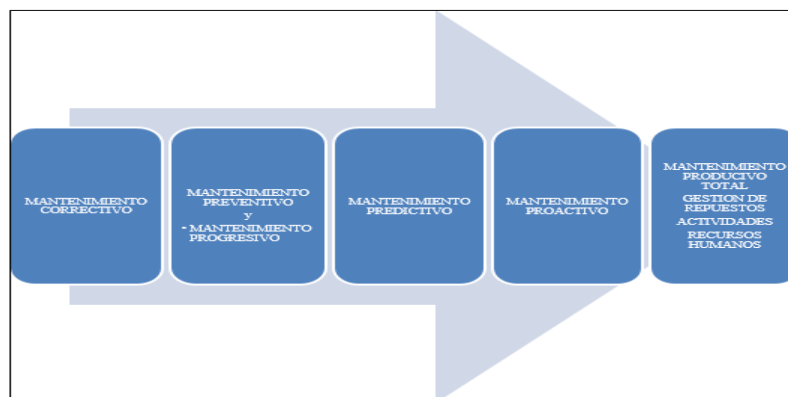


Figura 12. Esquema de la evolución del mantenimiento
Fuente: Autor

- *Mantenimiento correctivo.* Este tipo de mantenimiento se caracteriza por el tiempo de ejecución de las tareas, las cuales se extienden hasta que uno o varios elementos fallen. Una de las razones por las cuales se recurre a este tipo de mantenimiento es debido a la indisponibilidad de repuestos o por la disponibilidad de la máquina.

- *Mantenimiento preventivo.* La programación de inspecciones, tanto de funcionamiento como de seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, que deben llevarse a cabo de una forma periódica en base a un plan establecido; también es conocido como Mantenimiento Preventivo Planificado – MPP.

La característica principal de este tipo de mantenimiento es la de inspeccionar los equipos y detectar las fallas en su fase inicial, y corregirlas en el momento oportuno.

Ventajas del mantenimiento preventivo:

- Confiabilidad, los equipos operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado, y sus condiciones de funcionamiento.
- Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada de equipos/máquinas.
- Mayor duración, de los equipos e instalaciones.
- Disminución de existencia en almacén y, por lo tanto sus costos, puesto que se ajustan los repuestos de mayor y menor consumo.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento debido a una programación de actividades.
- Menor costo de las reparaciones. (SOLOMANTENIMIENTO.COM, 2013)

Desventajas del mantenimiento preventivo:

- Si existe una operación adecuada se puede obtener un mejor rendimiento de los elementos en su vida útil, por cuanto sería desperdicio de recursos realizar un reemplazo de un elemento que aún se encuentre en condiciones de operación.

- En relación al punto anterior, reemplazar elementos de la máquina que aún se puedan aprovechar, involucra ya sea una operación de reutilización en otro equipo o en otro caso desechar dicho elemento lo que involucra gastos de logística, y en el segundo caso impactos ambientales mayores. (SOLOMANTENIMIENTO.COM, 2013)

Mantenimiento preventivo establecido para el motor Wärtsilä Vasa 32. El mantenimiento necesario para la máquina es dependiente principalmente de las condiciones de operación. Los periodos establecidos en este programa están guiados solamente por valores, pero no deberían ser excedidos durante el periodo de garantía.

Cuando se use diesel o combustibles intermedios de relativamente buena calidad como combustible, puede ser posible alargar los intervalos de mantenimiento establecidos considerablemente dependiendo de la carga de la máquina, (WÄRTSILÄ, 2002)

Tabla 3. Programa de mantenimiento referente actividades fundamentales en los sistemas de lubricación agua de refrigeración y actividades rutinarias de operación.

Cada segundo día, independientemente de la máquina está o no en operación.	
Unidad	Actividad
Pre lubricación automática	Revisar operación.
Cigüeñal	Motores marinos: en una maquina detenida, girar el eje a una nueva posición.
Una vez a la semana, independientemente si la máquina está o no en operación.	
Proceso de arranque	Prueba de arranque (si la máquina está en stand-by).
Intervalo: 50 horas operativas	
Sistema de agua de refrigeración	Revisar el nivel de agua en el sistema de refrigeración.
Biela	Revisar ajuste los pernos de la biela.
Filtros de combustible y aceite	Revisar indicadores de caída de presión.
Medidores e indicadores	Tomar lecturas.
Regulador, actuador	Revisar nivel de aceite en el regulador.

Cárter de lubricación	Revisar nivel de aceite del cárter.
Filtro de rodaje	Remover el filtro de rodaje.
Intervalo: 500 horas operativas	
Filtro centrífugo	Limpiar filtro centrífugo (s).
Agua de refrigeración	Revisar la calidad del agua de refrigeración.
Presión de cilindros	Revisar la presión de los cilindros.
Aceite lubricante	Tomar muestra de aceite.
Intervalo: 1000 horas operativas	
Filtro de aceite	Reemplazar cartuchos de filtro de aceite.
Intervalo: 200 horas operativas	
Aceite lubricante	Cambiar aceite lubricante.
Intervalo: 12000 horas operativas	
Bomba de aceite	Inspeccionar la bomba de aceite.

Fuente: Manual de instrucciones del motor Wärtsilä Vasa 32

- *Mantenimiento predictivo.* Denominado también mantenimiento centrado en condición (CBM), ya que mediante el mismo se monitorea el funcionamiento de los componentes mediante pruebas o ensayos destructivos y no destructivos. Nos permite obtener una tendencia de la condición de la máquina facilitando en sus resultados la visualización de un tiempo estimado para programar la ejecución de trabajos. Las técnicas que se utilizan en estos procesos son ensayos no destructivos que se realizan en la máquina para vigilar su estado. Dentro de las pruebas que se realizan están:
 - Análisis de vibraciones
 - Ultrasonido
 - Termografía
 - Pruebas y mediciones específicas a cada componente
 - Análisis de aceite

Si se combina la Figura 1 (detección conceptual de la degradación), junto con la Figura 12 (curva F-P), tenemos una metodología más concisa para la toma de acciones durante el desarrollo de una falla. Como punto final se debe considerar el **análisis de causa raíz**, con el fin de evitar la recurrencia de la misma falla. Para lo cual se pueden utilizar metodologías como: arboles de decisión, gráficas espina de pescado, etc. Este proceso de detección de fallas es un modelo.

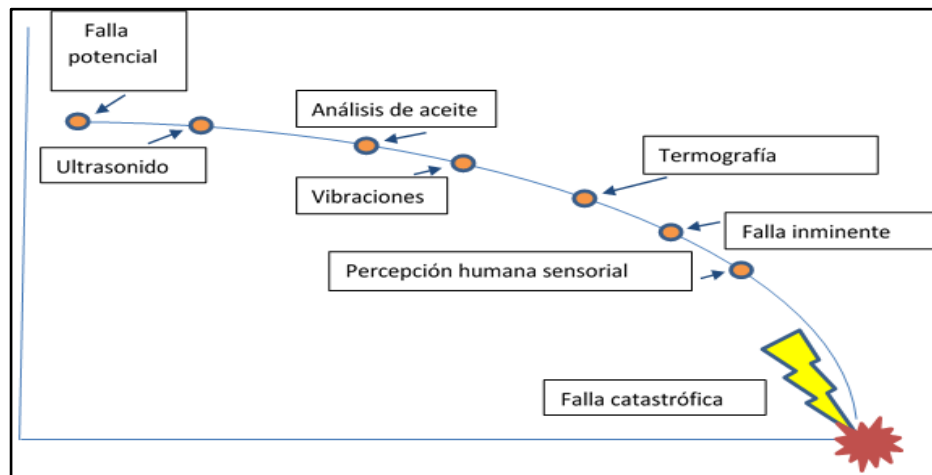


Figura 13. Curva F-P, evolución y evaluación de una falla

Fuente: <http://cpm-uk.com/asset-managment-programme/>, editado por Autor

2.6 Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo es una técnica de mantenimiento que consta de una serie de procesos sistemáticos, con los cuales se intenta analizar las causas y los efectos que se suscitan durante la aparición de las fallas en una máquina, y tratar de mitigarlas en su mayor grado posible y evitar su recurrencia.

Mediante estos procesos se puede reducir el tiempo de paradas no programadas, comparando patrones de fallas anteriores permitiendo adelantarse a un evento. Otro de los puntos a favor de llevar a cabo un análisis de causa y efecto, es la disponibilidad del activo, ya que mediante la identificación correcta de las fallas se soluciona efectivamente el problema completa o parcialmente considerando los alcances de cada planta de generación, lo cual nos garantiza que la falla no volverá a ocurrir o en caso de no poder solucionarla anticiparnos a un diagnóstico y poder desarrollar planes estratégico de mejora.

Para reducir el índice de ocurrencia de fallas, se puede ejecutar mejoras relacionadas al rediseño, procedimientos de mantenimiento, registro y gestión de la información concerniente a eventos que amenacen o hayan amenazado la confiabilidad de la instalación. Entre las acciones que se pueden llevar a cabo para solucionar las averías presentadas pueden estar: la reparación, reemplazo y/o mejora del equipo, mecanismo, elemento afectado o los factores externos que permitan su normal funcionamiento. El mantenimiento proactivo nos marca una ruta que nos guía hacia una mejora en la administración de la producción y repuestos, representando uno de los pilares fundamentales del mantenimiento centrado en confiabilidad.

2.6.1 *Características del mantenimiento proactivo.* La característica principal del mantenimiento proactivo es optimizar la operación de la máquina, utilizando varias técnicas de ingeniería que nos ayudan a mejorar la salud de cada equipo. Una de estas técnicas que se utiliza mayormente es el análisis e interpretación del aceite lubricante del motor. El motivo por el cual se recurre a esta herramienta es debido a que el aceite es el componente que circula por muchos elementos del motor recogiendo así información acerca de la salud de la máquina.

2.6.2 *Factores que incurren en el desarrollo de una falla.* Se han tomado en cuenta tres factores que intervienen para que una falla funcional tenga lugar, una vez que uno (s) de este (os) agentes ha intervenido de manera incorrecta alterando el contexto operacional, una avería podría suscitarse. Los agentes que se han tomado en cuenta son: el factor humano (p. ej., errores durante el mantenimiento), el factor operacional (errores ocasionados durante la operación de la máquina), factor ambiental (p. ej. características del combustible, aire, humedad relativa, etc.).

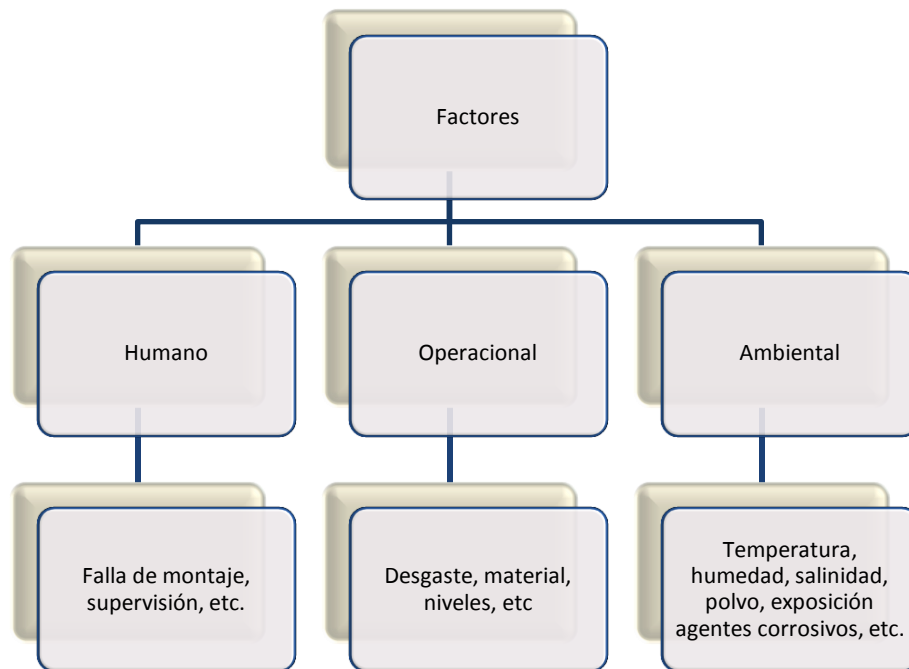


Figura 14. Tipos de factores relacionados a una falla.
Fuente: Autor

2.6.3 Tipos de fallas. Todos los elementos de la instalación están expuestos a fallas mecánicas debido a que se encuentran sometidos a cargas naturales de trabajo. Las fallas ocurren mayormente cuando se sobrepasa los esfuerzos para los cuales fueron diseñados cada elemento o a su vez también pueden ser causadas por deterioro a causa de su periodo de vida útil, un mal montaje o defectos durante la producción.

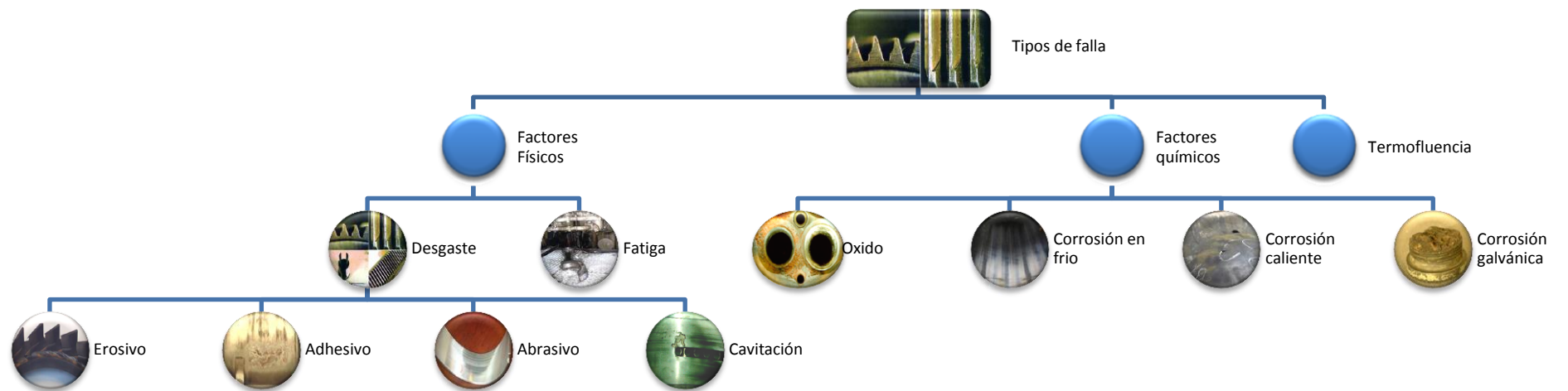


Figura 15. Clasificación de fallas en factores físicos y químicos
Fuente: Wärtsilä, editado por Autor

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO CENTRADO EN LA CONDICIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE

Muchas empresas y organizaciones reconocidas mundialmente que están de acuerdo que el 80% de la causa raíz de las fallas se relaciona con la contaminación del aceite lubricante. (TECHGNOSIS INTERNATIONAL S.A de C.V., 2013). Como referencia en la tabla 3 se hace referencia al *Jost Report*, en el cual se identifica que cerca del 60% de las fallas se relacionan con una deficiente lubricación o con la contaminación del fluido lubricante.

Tabla 4. Pérdidas aproximadas calculadas por desgaste, fricción y corrosión en UK, de acuerdo al Reporte Jost de 1966

Item	Proporción
Reducción de consumo de energía con reducción de fricción	7,5%
Ahorro en costo de lubricantes	20,0%
Ahorro en costos por reparación y reemplazo de partes	20,0%
Ahorro en pérdidas de tiempo no productivo (NTP)	Variable %
Ahorro en inversiones por altos índices de utilización y mayor eficiencia de la máquina	1,0%
Ahorro en inversión mediante ciclo de vida prolongado	5,0%
Ahorro en mano de obra.	13,0%

Fuente: Kennet E. Bannister, Lubrication for Industry, Industrial Press Inc.

El estudio se centra en el análisis de muestras de aceite realizado en laboratorio, también se utiliza la ponderación química con el fin de evaluar el impacto del combustible sobre el producto de la reacción con el aceite. Los parámetros bajo los cuales opera el sistema de lubricación fueron calculados y relacionados con instrucciones del manual. El estudio concluye con una proyección estimada de los resultados obtenidos.

Las muestras reportadas se realizaron en sitio y fueron reportadas por medio electrónico, cada muestra tiene su número de codificación que corresponde a una fecha específica:

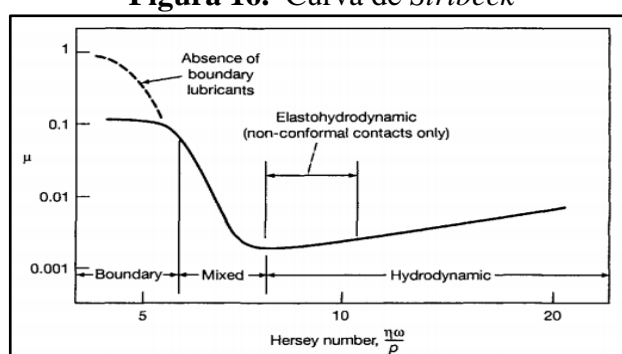
Tabla 5. Referencias de cada muestra

Información de las Muestras	
Ref, Laboratorio	Fecha
1299	18-07-13
0228	25-04-13
0181	21-02-13
1658	03-02-13
1610	08-10-12
1132	06-10-12

3.1 Lubricación

3.1.1 Tipos de lubricación. Los diferentes tipos de lubricación están regidos principalmente por la curva de *Stribeck* como se muestra en la Figura 23, de la cual el eje de las ordenadas pertenece al coeficiente de fricción bajo condiciones estables, mientras el eje de las abscisas representa el número de *Hersey*, el cual es un número adimensional. Identificación y descripción de cada zona en la curva de *Stribeck*:

Figura 16. Curva de *Stribeck*



Fuente: Fundamentals of Fluid Film Lubrication, Bernard J. Hamrock, Steven R. Schmid y Bo O. Jacobson, Segunda Edición, Marcel Dekker Inc., 2004. Pag 17-18

- **Lubricación límite.** Predomina el régimen de **lubricación límite** y es casi horizontal lo que confirma que en esta región el coeficiente de rozamiento, μ_r , está poco influenciado por las variaciones de velocidad, presión y viscosidad.
- **Lubricación mixta.** Corresponde a una rápida reducción del rozamiento cuando crece el parámetro de *Hersey*, H_s , lo que puede producirse como consecuencia de una elevación de la velocidad o de una disminución de la presión. Existe en esta región condiciones de **lubricación mixta**, transición entre el límite e hidrodinámica, que se analiza en el punto C.

- *Lubricación hidrodinámica.* A partir de este punto existe la lubricación en **régimen hidrodinámico** al crecer H_s . Se produce un lento crecimiento del coeficiente de rozamiento debido al cizallamiento supletorio de la película de aceite. (FERRER GIMÉNEZ, y otros, 2003)

3.1.2 Características del sistema de lubricación. La identificación de las características y el diseño del sistema de lubricación es importante para reconocer sus capacidades, punto (s) de muestreo, regímenes de trabajo y disposición de sus componentes.

Tabla 6. Características del sistema de lubricación

Característica	Descripción
Motor	
Motor	<i>Wärtsilä Vasa 32 LN</i>
Velocidad nominal	720 rpm
Sentido de giro	<i>Clockwise</i>
Sistema de lubricación	
Dimensión de tanque de aceite nuevo	7m ³ /máquina
Dimensión de tanque de aceite usado	3,0705m ³ /máquina
Intervalo de cambio de filtros de aceite	Cada 1000 horas operativas
Intervalo de cambio de aceite	Cada 2000 horas operativas. Con posibilidad de expandirse según análisis de aceite realizado previamente.
Tipo de cárter	Húmedo
Volumen de aceite en cárter	2670 L

Fuente: Manual de instrucciones del motor *Wärtsilä Vasa 32*

Constitución del diseño del sistema de lubricación. Comprende los principales elementos del sistema de lubricación, facilitándonos de esta manera el reconocimiento de la circulación del aceite por el sistema y localización de puntos de muestreo.

Descripción de los componentes (ver Figura 26):

01: Bomba principal de lubricación

03: Filtro centrífugo

08: Válvula reguladora de presión

09: Válvula de apagado, solamente cuando la bomba de pre lubricación está instalada

10: Válvula anti retorno

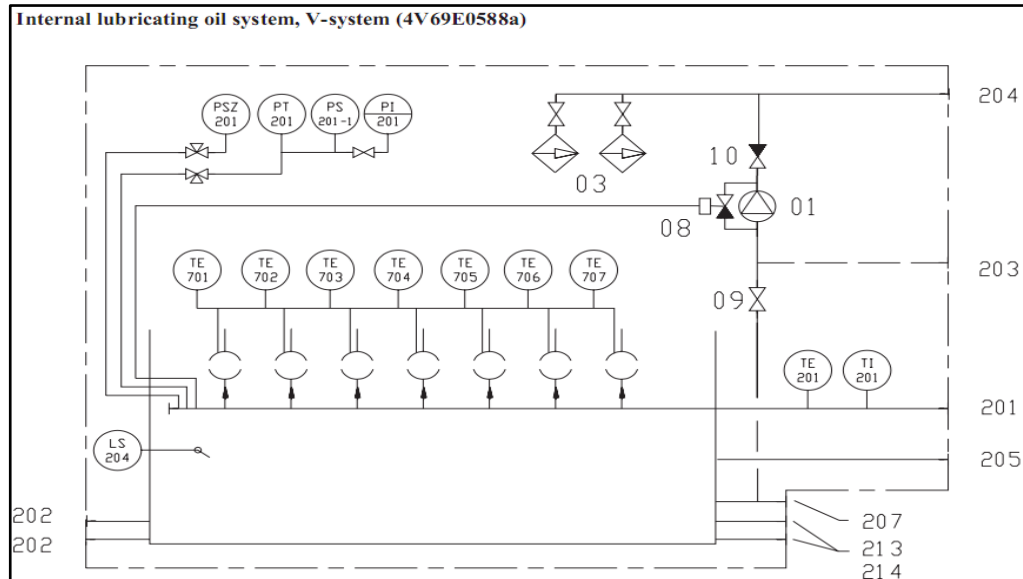


Figura 17. Esquema del sistema de lubricación

Fuente: Wärtsilä Vasa 32 Project Guide

3.1.2.1 Cálculos del sistema de lubricación. El sistema de lubricación está regido por ciertos parámetros característicos que determinan sus capacidades operativas y se ha calculado en función de la potencia nominal de la máquina, teniendo como referencia también la dimensión del ducto de suministro de aceite desde la bomba mostrada en la tabla 6. Dentro de estos parámetros tenemos:

Multiplicidad de circulación del aceite del motor, K. Determina la frecuencia con que unas mismas porciones de aceite entran en la zona de oxidación fuerte, y esta expresada como (TORMOS, 2005):

$$K = \frac{Q_b}{V} \quad (1)$$

Donde:

Q_b = Suministro de la bomba de aceite, en l/min.

V = Capacidad del sistema de lubricación (volumen del cárter), en l.

Dados los valores recomendados de velocidad de succión y entrega de aceite lubricante a través de estos respectivos ductos en función de la dimensión de diámetro nominal se tiene:

Tabla 7. Ducto principal de suministro de aceite a la máquina

Dimensión de la tubería DN	Entrega (m/s)
100	1,5-1,7

Fuente: *Power Plants, Handbook for Mechanical Systems, WÄRTSILÄ DIESEL*

Como:

$$Q_b = V * A \quad (2)$$

Dónde:

V= Velocidad del fluido, en m/s.

A= Área de la tubería conductora del fluido, en m².

Siendo:

$$A = 0,00785398 \text{ m}^2$$

Entonces:

Q_b para una velocidad de salida de aceite lubricante de 1,5 m/s

$$Q_b = 1,5 \text{ m/s} * 0,00785 \text{ m}^2$$

$$Q_b = 0,011775 \text{ m}^3/\text{s} = 706,5 \text{ l/min}$$

Q_b para una velocidad de salida de aceite lubricante de 1,6 m/s

$$Q_b = 1,6 \text{ m/s} * 0,00785 \text{ m}^2$$

$$Q_b = 0,01256 \text{ m}^3/\text{s} = 753,6 \text{ l/min}$$

Q_b para una velocidad de salida de aceite lubricante de 1,7 m/s

$$Q_b = 1,7 \text{ m/s} * 0,00785 \text{ m}^2$$

$$Q_b = 0,013345 \text{ m}^3/\text{s} = 800,7 \text{ l/min}$$

Capacidad específica del sistema de lubricación, q. Representa la relación entre la capacidad del sistema de lubricación y la potencia efectiva del motor N_e (TORMOS, 2005).

$$q = \frac{V}{N_e} \quad (3)$$

Donde:

N_e = Potencia efectiva del motor, en kW.

Se obtiene:

$$q = \frac{2670 \text{ l}}{6582 \text{ kW}}$$

$$q = 0,40565 \text{ l/kW}$$

El suministro específico de la bomba de aceite, α_b . Se determina por la relación entre la alimentación de la sección principal y la potencia nominal del motor. (TORMOS, 2005)

$$\alpha_b = \frac{Q_b}{N_e} \quad (4)$$

Para suministro a 1,5 m/s:

$$\alpha_b = \frac{706,5 \text{ l/min}}{6582 \text{ kW}} = 0,107 \text{ l/kW min} = 6,44 \text{ l/kWh}$$

Para suministro a 1,6 m/s:

$$\alpha_b = \frac{753,6 \text{ l/min}}{6582 \text{ kW}} = 0,11 \text{ l/kW min} = 7,9 \text{ l/kWh}$$

Para suministro a 1,7 m/s:

$$\alpha_b = \frac{800,7 \text{ l/min}}{6582 \text{ kW}} = 0,12 \text{ l/kW min} = 7,2989 \text{ l/kWh}$$

Separación de aceite lubricante. Las separadoras son usadas para la separación de mezclas líquidas o la separación de mezclas de sólidos y líquidos. Altas fuerzas centrífugas son producidas en el tazón rotativo. Bajo la influencia de las fuerzas centrífugas, la separación de las mezclas líquidas y/o la expulsión de partículas sólidas toman lugar más rápidamente. Los componentes específicamente más pesados son desplazados hacia la periferia del tazón, mientras que los componentes específicamente

más livianos son desplazados hacia el centro del tazón. Las altas fuerzas centrífugas son producidas por velocidades muy altas del tazón.

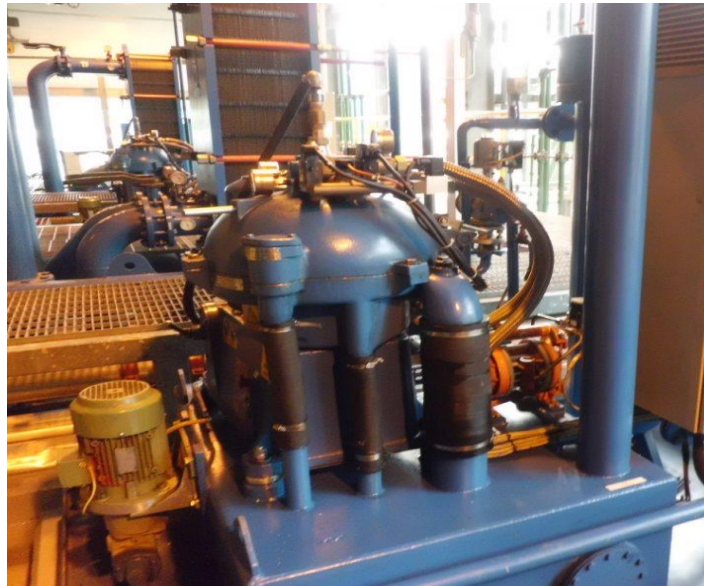


Figura 18. Separadora de aceite lubricante del motor
Fuente: Wärtsilä

La máquina mostrada en la Figura 27, es una separadora centrífuga de alta velocidad con tazón de auto-limpieza. Los prerequisites para la separación es que los componentes del producto puedan ser separados mecánicamente, tengan diferentes densidades y no se emulsionen.

Para un eficiente centrifugado se debe tener en cuenta: la temperatura a la que el aceite debe ser calentado antes del centrifugado debe estar entre 80-95°C, utilizando preferiblemente la temperatura más alta. Otra de las condiciones para obtener una mejor eficiencia en el centrifugado del aceite es que la centrifuga debe ser capaz de pasar la totalidad de la cantidad de aceite en circulación de 4-5 veces cada 24 horas a un rango del 20% del flujo total. Esto se puede determinar utilizando la siguiente formula:

$$Q = P * z * n/t \quad (5)$$

Dónde:

Q= cantidad [l/h]

P= potencia del motor [kW]

z= factor de conversión [l/kW]

n= factor en función del combustible

t= tiempo de operación al día [h] (WÄRTSILÄ DIESEL)

Entonces:

Flujo al 100% por ciclo:

$$Q_{100\%} = 6582 \text{ kW} * 1,36 \frac{l}{\text{kW}} * \frac{5}{23 \text{ h}}$$
$$Q_{100\%} = 1945,98 \text{ l/h}$$

Flujo al 20% por ciclo:

$$Q_{20\%} = 1945,98 \text{ l/h} * 0,2 = 389,19 \text{ l/h}$$

Caudal de aceite lubricante que pasa por la separadora cada 24 horas de operación al 20% de su capacidad.

$$Q_{20\%} * 24 \text{ hrs} = 389,19 \text{ l/h} * 24 = 9340,56 \text{ l/día}$$

Relacionando con la capacidad real del cárter:

Para 4 ciclos por día:

$$Q_{\text{cárter}} * 4 = 10680 \text{ l/día}$$

Para 5 ciclos por día:

$$Q_{\text{cárter}} * 5 = 13350 \text{ l/día}$$

De acuerdo a algunas configuraciones la separadora de aceite puede realizar un ciclo cada hora, completando entre 23 a 24 ciclos de separación al día.

Compilación de la información. En la Figura 28 se representa el proceso de selección para la realización del análisis de aceite, misma que contiene los parámetros a considerar al momento de llevar a cabo la realización del muestreo, análisis, monitoreo y control.

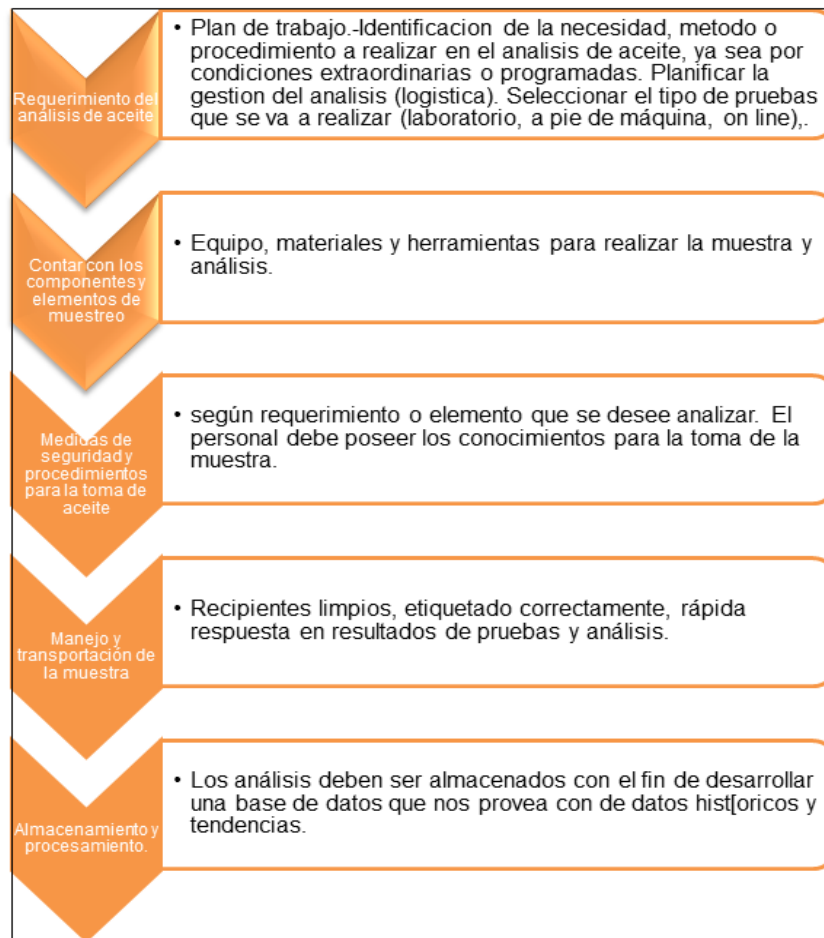


Figura 19. Proceso de gestión del análisis de aceite

Fuente: Autor

Tipo de análisis según su disposición. Los análisis de aceite lubricante se los puede realizar en función de varios factores, como pueden ser el: el tiempo de respuesta ante los resultados, disposición económica, criticidad de la máquina y condiciones operativas, capacidad técnica del personal a cargo del análisis. Los tipos se pueden clasificar en función de la locación de realización de las pruebas, siendo:

Ventajas y desventajas de los tipos de pruebas de acuerdo a su disposición:

Tabla 8. Tipos de análisis de aceite según su disposición

Tipo de análisis	Ventajas	Desventajas
Análisis de laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> - Procedimientos estandarizados - Precisión de resultados - El rango de pruebas es amplio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo prolongado de entrega de muestras y resultados. - Mayor costes en logística y laboratorio

Análisis en sitio	<ul style="list-style-type: none"> Ahorro de tiempo en logística y laboratorio. Equipos no tan sofisticados o complejos. 	<ul style="list-style-type: none"> No son precisos. Requieren de calibración periódica. El rango de pruebas es limitado a ciertas básicas.
Monitoreo en línea	<ul style="list-style-type: none"> Permite comparar el comportamiento de cierta (s) propiedades del aceite en tiempo real. No requieren logística para entrega de muestras y resultados. Poseen software que permiten el manejo/administración de los datos. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipos de especial manejo / frágil. Necesitan re-calibración periódica. Requieren mantenimiento frecuente. Pueden mostrar parámetros fuera de rango. El rango de pruebas es limitado.

Autor:

3.1.3 Aceite lubricante. Es un fluido que debe poseer las suficientes características para reducir la fricción, prevenir la corrosión, refrigerar y en cierto grado mejorar la estanqueidad en ciertos mecanismos. El aceite utilizado en la máquina es el Shell Argina T40, que cumple con especificaciones del fabricante de la máquina de acuerdo a la tabla de aceites recomendados, en la tabla 6 se muestra la información general del aceite.

Tabla 9. Información general del aceite

Aceite	<i>Shell Argina SAE 40</i>
BN	30
<i>Kinematic Viscosity @ 40°C cSt 100°C cSt</i>	139 14.9
<i>Viscosity Index</i>	102
<i>Density @ 15°C kg/l</i>	0.916
<i>Flash Point°C (Pensky-Martens Closed Cup)</i>	225
<i>Pour Point °C</i>	-18
<i>Sulphated Ash % wt</i>	3.7
<i>Load Carrying Capacity (FZG Gear Machine) Pass Stage</i>	11

Fuente: <http://s06.static-shell.com/content/dam/shell/static/marine-products/downloads/pdf/lubricants/applications/argina-t30.pdf>

Un aceite lubricante está compuesto por dos elementos:

- **Bases.** Constituye entre el 80 al 90% de la composición del aceite, y pueden ser de origen mineral, grasos o fijos y sintéticos.

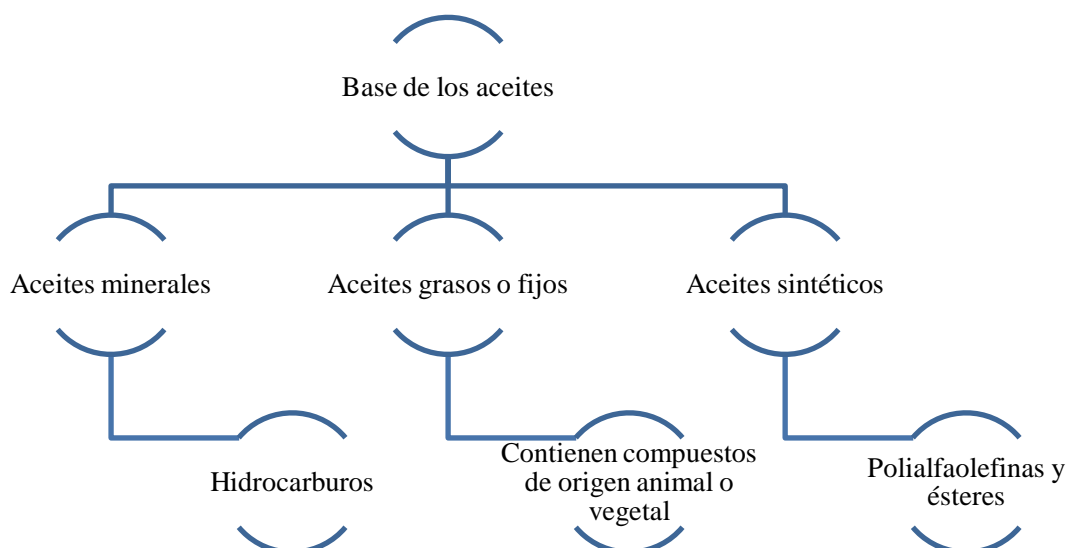


Figura 20. Clasificación de los aceites según sus bases.

El aceite Shell Argina T40 posee una base 100% de origen mineral.

- **Aditivos.** Los aditivos son elementos que modifican las características de un aceite base adaptándolo para condiciones específicas, mejorando así su rendimiento. Componen aproximadamente entre 10 al 20% de la composición del aceite lubricante, de acuerdo a la muestra se pudo identificar ciertos elementos como:

Tabla 10. Resultado de la concentración en ppm de trazas de aditivos en la muestra

Elemento/Muestra	1299	228	181	1658	1610	1132
Cobre	2	1	2	3	5	5
Boro	1	1	<1	4	1	1
Potasio	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Molibdeno	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Fósforo	256	351	245	397	347	300
Zinc	341	431	326	528	429	397
Calcio	9733	>9999	9352	>9999	>9999	>9999
Bario	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Magnesio	31	45	35	54	48	42

Fuente: Wäertsilä

3.1.3.1 Factores que gobiernan la condición del aceite lubricante en la máquina. En la Figura 16, se muestran las principales zonas de formación de desgaste y las fuentes de contaminación del aceite lubricante dentro de la máquina, los cuales afectan a la salud del aceite y los componentes que dependen de la lubricación.

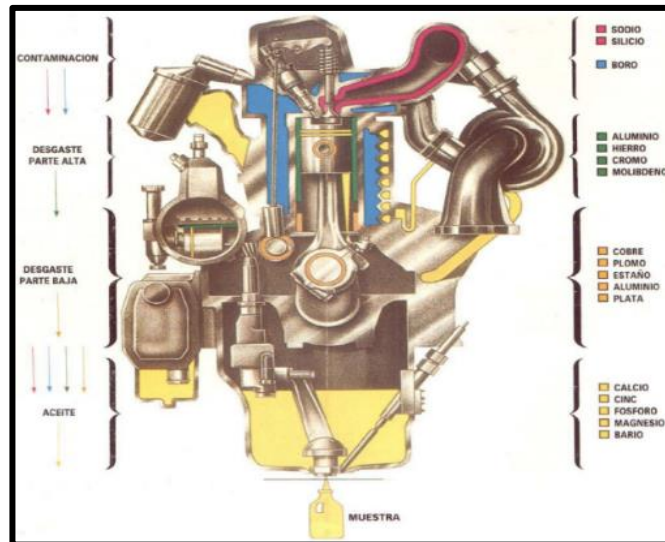


Figura 21. Principales zonas en la formación de desgaste y contaminación en un motor

Fuente: Shell lubricants

De acuerdo a las propiedades de los aceites podemos clasificarlas en físico-químicas y metales ya sea en forma de desgaste o aditivos.

- *Propiedades físico-químicas.* Al igual que cualquier líquido, el aceite lubricante posee sus propias características y propiedades entre las cuales están:
 - *Índice de viscosidad.* Es un numero adimensional, y se define como la propiedad del aceite para mantener su viscosidad en condiciones variantes de temperatura.
 - *Viscosidad.* Es la propiedad que posee un líquido a la resistencia del movimiento. Su medida es la viscosidad cinemática y esta expresada en *centistokes* (cSt). Existen algunos parámetros que influyen en la alteración de la viscosidad en el aceite tales como: presencia de hollín producto de la combustión, oxidación debido a presencia de agua o contaminación debido a la formación de ácidos, etc.

- *Número de Basicidad.* Es una medida de la alcalinidad del lubricante expresada en mg KOH, ayuda a contrarrestar la contaminación por ácidos en el aceite lubricante. Esta medida está principalmente relacionada con el contenido de azufre (S) del combustible empleado en la máquina.
- *Densidad.* Es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia, esta expresada mayormente en unidades de Kg/m³.

Otras pruebas que se pueden considerar en las muestras pueden ser: flash point, demulsibilidad, espuma.

Tabla 11. Resultado de la concentración de las propiedades fisicoquímicas del aceite

Propiedades físico-químicas del aceite				
Muestra	TBN	GLY TEST	Visc.	Visc. A 100°C
1299	26,9	NEG ¹	40	14,7
0228	30	NEG	40	14,4
0181	28,33	NEG	40	14,5
1658	28,07	NEG	40	14,5
1610	28,33	NEG	40	14,6
1132	28,33	NEG	40	14,3

Fuente: Wärtsilä

- *Traza de metales presentes en las muestras.* Corresponde a la concentración de metales contenidos en la muestra correspondiendo dependiendo de su origen a: metales de desgaste, aditivos y contaminantes. Los metales presentes en el aceite lubricante pueden ser:

- Hierro:

Propiedades: es un metal dúctil.

Aplicación: bloque de motor, aros, cojinetes, paredes de cilindros, cabezotes, herrumbre.

- Cromo:

¹ NEG: negativo

Propiedades: resistencia y dureza.

Aplicación: ejes, anillos, cromato del sistema de agua.

- Aluminio:

Propiedades: liviano, buen disipador de calor y ayuda en la transferencia térmica

Aplicación: casquillos, algunos cojinetes, pistones, turbo cargador, ruedas compresoras.

- Cobre:

Propiedades: es un metal suave utilizado para desgastarse primero que otros para proteger otros componentes., utilizado también por sus propiedades antioxidantes.

Aplicación: cojinetes, casquillos, enfriadores de aceite, radiadores, anillos de empuje de árbol de levas, casquillos de biela.

- Plomo:

Propiedades: es un metal suave, flexible y su punto de fusión es bajo. (Lenntech B.V, 2013)

Aplicación: recubrimiento de cojinetes.

- Níquel:

Propiedades: el níquel es aleado con el hierro en aceros de alta resistencia.

Aplicación: vástagos de las válvulas, guías de válvula, insertos de anillos en pistones. También es un compuesto del petróleo crudo en sus componentes metálicos.

- Plata:

Propiedades: disipa el calor y reduce el coeficiente de fricción.

Aplicación: jaula de rodamientos, soldaduras de plata, cojinetes de turbo cargador y cojinetes de bulón.

- Estaño:

Propiedades: es un metal suave, flexible, punto de fusión bajo y resistente a la corrosión.

Aplicación: Cojinetes, pistones.

- Molibdeno:

Propiedades: posee un alto punto de fusión, alta dureza (1530MPa) y buena resistencia a la corrosión. El disulfuro de molibdeno se usa como lubricante a altas temperaturas, a las cuales los aceites normales descomponen. (QUÍMICAWEB, 2013)

Aplicación: anillos de pistón, aditivos de aceite. Aditivo modificador de fricción.

- Titanio:

Propiedades: es un metal cuya ductilidad es similar a la del acero con su ventaja de ser más ligero. También es resistente a la corrosión.

- Antimonio:

Propiedades: antidesgaste y antioxidante.

Aplicación: cojinetes.

- *Zinc*. Aditivo anti desgaste, el cual provee una película protectora.
- *Fosforo*. Aditivo anti desgaste y extrema presión, que provee una película protectora en áreas de alta presión. Aceites para extrema presión son caracterizados por alto contenido de fósforo.
- *Bario*. Aditivo detergente.
- *Calcio y magnesio*. Son aditivos basados en alcalinidad, usados para neutralizar ácidos, también poseen características detergentes.
- *Boro*. Inhibidor de desgaste y modificador de fricción, el boro también es encontrado como un aditivo en el refrigerante como borato.
- *Potasio*. Aditivo refrigerante, y su presencia en el aceite es indicativo de contaminación del refrigerante. En forma de base se presenta como la reserva alcalina que posee el aceite lubricante.
- *Silicio*. Externo por contaminación por arena o polvo, aditivo antiespumante presente en forma de silicona, sellantes.
- *Sodio*. Contaminación externa, aditivo o refrigerante. El sodio no es un metal de desgaste, en aditivo como inhibidor de la corrosión en aceites y refrigerantes. Su fuente proviene del refrigerante o el medio ambiente (sal), también puede estar presente en forma de contaminación por medio del petróleo crudo. (APPLYING OIL ANALYSIS, 2008)
- *Vanadio*. Presente por contaminación con petróleo crudo.

Tabla 12. Resultado de la concentración de trazas de metales como partículas de desgaste y agentes externos de contaminación en la muestra

Elemento/Muestra	1299	0228	0181	1658	1610	1132
Hierro	7	6	8	12	10	8
Cromo	1	<1	<1	1	1	<1
Niquel	27	15	44	68	39	30
Aluminio	<1	<1	<1	2	3	<1
Plomo	<1	<1	<1	<1	1	<1
Estaño	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Plata	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Titanio	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Silicio	8	16	4	9	9	9
Sodio	8	7	7	11	9	12
Antimonio	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Vanadio	64	37	112	166	88	74

Fuente: Wärtsilä

- *Factores que alteran las propiedades fisicoquímicas del aceite.* Contribuyen a la degradación del aceite lubricante, provocando la reducción de la película lubricante, oxidación o alterando su viscosidad:
 - *Agua.* El agua es una agente que afecta en la oxidación del aceite lubricante y a su vez en la estabilidad de la película lubricante. Esta puede estar en contacto con el aceite mediante puntos fríos dentro del motor, es decir por medio de condensación, o a su vez por fugas en el sistema de refrigeración.
 - *Oxidación.* La oxidación en el combustible acelera la degradación del aceite, debido a una saturación de partículas de oxígeno.
 - *Hollín.* Se presenta principalmente en los productos de la combustión y son elementos insolubles. Una presencia significativa de hollín producirá un incremento en la viscosidad del aceite.
 - *Nitración.* La nitración se produce principalmente por los productos de la combustión del combustible.

- *Sulfatación.* Se presenta debido al contenido de azufre de combustible, el cual puede contaminar el aceite lubricante mediante el blow-by entre las paredes de las camisas y los rines del pistón, dando lugar así a la formación de ácidos en el aceite lubricante, como: sulfatos de calcio, magnesio o bario.
- *Combustible.* Trazas de combustible que se puedan hallar en la muestra, como contaminación directa.

Tabla 13. Resultados de las pruebas de hollín, combustible y agua puedan alterar la condición del aceite

Elemento/Muestra	1299	0228	0181	1658	1610	1132
LEM Soot	0,18	0,09	0,25	0,24	2,09	0,17
FUEL %	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<1,0	<1,0
Water	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1

Fuente: Wärtsilä

3.1.3.2 Esfuerzos del aceite lubricante. Los principales esfuerzos experimentados por un lubricante por un motor de media velocidad operando con combustible pesado son: esfuerzos ácidos, esfuerzo termo/oxidativo y esfuerzo de asfaltenos. Estos esfuerzos y sus consecuencias para la máquina y la condición del aceite son resumidos en la Tabla 10. Aunque hay otros esfuerzos, los tres presentados, son considerados los más importantes para este tipo de lubricante de máquinas basado en los estudios del laboratorio de máquinas. (CIMAC, 2004)

Tabla 14. Esfuerzos de los aceites lubricantes para máquinas de media velocidad

Esfuerzo:	Causado por:	Consecuencias para la máquina y el lubricante:
Esfuerzo ácido	Ácidos de azufre, ácidos de la oxidación	Desgaste corrosivo, depósitos, pérdida de BN, vida del lubricante más corta.
Esfuerzo termo/oxidativo	Temperaturas más altas otorgando un acelerado termo/oxidativo rompimiento del lubricante y combustible.	Depósitos, lodos, desgaste corrosivo del material de los cojinetes, corrosión caliente en pistones (de altos depósitos debajo de la corona del pistón).
Esfuerzo de asfaltenos	Contaminación del aceite por combustible (asfaltenos).	Depósitos, lacas, lodos

Fuente: CIMAC, Oil stress investigations in Shell's medium speed laboratory engine, PAPER No.21, ©CIMAC Congress 2004, Kyoto.

Los asfáltenos. Son fracciones del petróleo crudo insolubles en n-pentano o n-heptano, pero solubles en tolueno y xileno. Están constituidos por hetero-átomos como el azufre, nitrógeno y oxígeno, y metales como: hierro, níquel y vanadio, (ver Figura 25).

El elevado contenido de asfáltenos puede dar lugar a la formación de depósitos en la cámara de combustión y sistema de gases de escape. También se puede presentar precipitación de depósitos en el sistema de alimentación de combustible al motor (tuberías, separadoras, filtros). Debido a la dureza que presenta este tipo de compuestos (alto peso molecular y compuestos metálicos), pueden dar lugar a la aceleración del desgaste principalmente en los componentes del sistema de inyección.

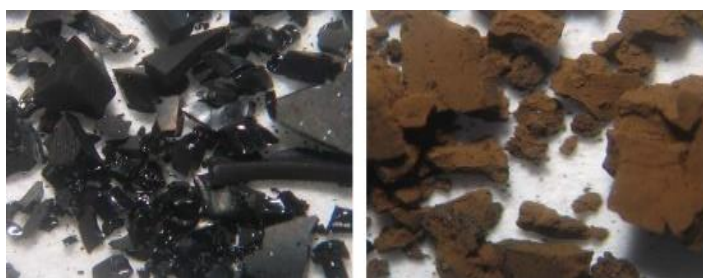
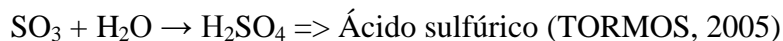
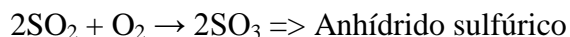
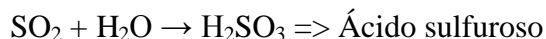


Figura 22. Apariencia de los asfaltenos (n-c7 y n-c5)

Fuente: <http://paraffindepotionandcontrol.wikispaces.com/5.+Asphaltene>

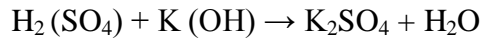
El esfuerzo ácido. Es producido por los residuos de la combustión y pueden entrar en contacto con el aceite lubricante por medio del blow-by entre camisa y aros del pistón, se pueden formar ácidos sulfurosos y sulfúricos, degradando la reserva alcalina (BN) del aceite lubricante y promoviendo la corrosión en los componentes metálicos del motor.



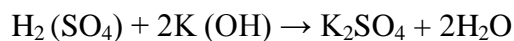
Reacción de neutralización entre el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el número de alcalinidad del aceite (KOH):

$H^{+1}(SO_4)^{-2} + K^{+1}(OH)^{-1} \Rightarrow$ Hidrogeno con valencia +1 cuando se forma un ácido

Se obtiene sulfato de potasio y agua como producto de la reacción



Para balancear la reacción se agrega el 2 como múltiplo en los componentes del hidróxido de potasio (KOH), y el mismo múltiplo en el agua (H₂O), para que el número de átomos sea el mismo en el reactivo que en el producto, obteniendo:



3.1.4 Ponderación estadística de los resultados

Con el propósito de analizar la trazabilidad de la variación de los datos de las seis últimas muestras en el periodo entre el 6 de octubre del 2012 al 18 de julio del 2013, con una acumulación aproximada de 6500 horas de operación. El análisis de los parámetros está dividido en dos partes:

Evaluación de datos en función del tiempo. Para la ponderación se utiliza el método incremental de acuerdo a la siguiente fórmula utilizada en tabla de Microsoft Excel.

Aunque algunos de los datos no presenten valores de alarma o condenatorios de acuerdo a la norma establecida por el fabricante para la evaluación del estado del aceite lubricante, se desarrolla el sistema de incrementos con el fin de observar en puntos porcentuales la tasa de crecimiento de cada parámetro, ya que pueden alertar de una condición anormal o presencia de alguna falla dentro del sistema.

Los incrementos entre el 50 al 80% se han considerados dentro de un rango de alerta, y los incrementos mayores que el 81% son considerados como de inmediata atención.

Tabla 15. Tabla referencial utilizada para la proyección por el método incremental

Muestra	Elemento X	Incremento X_i	Δ/X_i
1132	X_1		
1610	X_2	$=X_{2-1}$	$=X_{2-1}/X_1$
1658	X_3	$=X_{3-2}$	$=X_{3-2}/X_2$
0181	X_4	$=X_{4-3}$	$=X_{4-3}/X_3$
0228	X_5	$=X_{5-4}$	$=X_{5-4}/X_4$
1299	X_6	$=X_{6-5}$	$=X_{6-5}/X_5$
Total incrementos=		=Suma ($X_{2-1} \dots$)	=Suma($X_{2-1}/X_1 \dots$)

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/153449751/Metodos-de-Proyeccion-estadistica>

- Resultados de pruebas físico-químicas:

Número de basicidad. De acuerdo a los porcentajes de incremento o precipitación, se puede tomar en cuenta las tres primeras muestras para una proyección de la ponderación, ya que como se observa en la tabla los valores de las dos últimas muestras que podrían corresponder a un cambio de aceite alteran los valores significativamente.

Tabla 16. Tabla incremental de la proyección del BN

Muestra	BN	Incremento BN	Δ /periodo anterior BN
1132	28,33		
1610	28,33	0	0,0%
1658	28,07	-0,26	-0,9%
0181	28,33	0,26	0,9%
0228	30	1,67	5,9%
1299	26,9	-3,1	-10,3%
Total incrementos=			-4,4%

Fuente: Autor

Viscosidad. El incremento de la viscosidad no presenta variaciones relevantes, manteniéndose su condición bastante estable.

Tabla 17. Tabla incremental de la proyección de la viscosidad

Muestra	Visc. A 100°C	Incremento Visc.	Δ /periodo anterior Visc.
1132	14,3		
1610	14,6	14,03	0%
1658	14,5	13,47	-0,017%
0181	14,5	13,83	0,018%

0228	14,4	15,5	0,12%
1299	14,7	12,5	-0,22%
Total incrementos=			-1,0E-01%

Fuente: Autor

- *Análisis espectro químico:*

Hierro (Fe). El nivel de concentración de hierro en la muestra presenta incremento de 45% dentro de las primeras tres muestras (3000 horas), posteriormente el contenido de hierro tiende a estabilizarse.

Tabla 18. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Hierro

Muestra	Hierro	Incremento Fe	Δ /periodo anterior Fe
1132	8		
1610	10	2	25,0%
1658	12	2	20,0%
0181	8	-4	-33,3%
0228	6	-2	-25,0%
1299	7	1	16,7%
Total incrementos=			3,3%

Fuente: Autor

Níquel (Ni). Presenta incrementos aleatorios en la muestra 1658 de 74,4% y en 1299 de 80,0%, siendo posible fuente de contaminación por combustible, lo cual se debe corroborar con el análisis incremental de vanadio y el correlacional entre ambos.

Tabla 19. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Níquel

Muestra	Níquel	Incremento Ni	Δ /periodo anterior Ni
1132	30		
1610	39	9	30,0%
1658	68	29	74,4%
0181	44	-24	-35,3%
0228	15	-29	-65,9%
1299	27	12	80,0%
Promedio 3 primeras muestras=			83,2%

Fuente: Autor

Cobre (Cu). A pesar de presentar un incremento de 100% en la ultima muestra, el total de sus incrementos demuestra una reducción de la concentración del mismo en las demás muestras, dando como resultado una disminución de -23,3% de la población de datos.

Tabla 20. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Cobre

Muestra	Cobre	Incremento Cu	Δ /periodo anterior Cu
1132	5		
1610	5	0	0,0%
1658	3	-2	-40,0%
0181	2	-1	-33,3%
0228	1	-1	-50,0%
1299	2	1	100,0%
Promedio 3 primeras muestras=			-23,3%

Fuente: Autor

Silicio (Si). Incremento del 300% de silicio en la muestra correspondiente al cambio de aceite, posteriormente el porcentaje cae un 50%, lo cual puede ser indicio de contaminación en el tanque de aceite nuevo y el descenso correspondería al aceite que fue purificado por medio de la separadora con el transcurso de las horas de operación.

Tabla 21. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Silicio

Muestra	Silicio	Incremento Si	Δ /periodo anterior Si
1132	9		
1610	9	0	0,0%
1658	9	0	0,0%
0181	4	-5	-55,6%
0228	16	12	300,0%
1299	8	-8	-50,0%
Promedio 3 primeras muestras=			194,4%

Fuente: Autor

Sodio (Na). La concentración de sodio en la muestra un descenso paulatino, resultando en un total de la tasa incremental de -24,9%.

Tabla 22. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Sodio

Muestra	Sodio	Incremento Na	Δ /periodo anterior Na
1132	12		
1610	9	-3	-25,0%
1658	11	2	22,2%
0181	7	-4	-36,4%
0228	7	0	0,0%
1299	8	1	14,3%
Promedio 3 primeras muestras=			-24,9%

Fuente: Autor

Fósforo (P). El diferencial incremental de la muestra 0181 a 0228 se incrementa en un 81,6%, debido al cambio de aceite y un incremento de fosforo como aditivo.

Tabla 23. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Fósforo

Muestra	Fósforo	Incremento P	Δ /periodo anterior P
1132	300		
1610	347	47	15,7%
1658	397	50	14,4%
0181	245	-152	-38,3%
0228	351	106	43,3%
1299	256	-95	-27,1%
Promedio 3 primeras muestras=			8,0%

Fuente: Autor

Zinc (Zn). Al igual que el caso del fósforo, presenta un incremento en la muestra 0228 por el cambio de aceite.

Tabla 24. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Zinc

Muestra	Zinc	Incremento Zn	Δ /periodo anterior Zn
1132	397		
1610	429	32	8,1%
1658	528	99	23,1%
0181	326	-202	-38,3%
0228	431	105	32,2%
1299	341	-90	-20,9%
Promedio 3 primeras muestras=			4,2%

Fuente: Autor

Magnesio (Mg). Como se presentó anteriormente el magnesio es un metal que puede estar presente como aditivo alcalino para neutralizar ácidos por lo cual su comportamiento se puede relacionar con el BN, encontrando una ligera disminución del -10,9%.

Tabla 25. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Magnesio

Muestra	Magnesio	Incremento Mg	Δ /periodo anterior Mg
1132	42		
1610	48	6	14,3%
1658	54	6	12,5%
0181	35	-19	-35,2%
0228	45	10	28,6%
1299	31	-14	-31,1%
Promedio 3 primeras muestras=			-10,9%

Fuente: Autor

Vanadio (V). Relacionando su comportamiento con la concentración del níquel, presenta un incrementos en las muestras 1658 del 88,6% y en la 1299 del 73%, presentando un aumento total del 81%.

Tabla 26. Tabla incremental de la proyección de la concentración del Vanadio

Muestra	Vanadio	Incremento V	Δ /periodo anterior V
1132	74		
1610	88	14	18,9%
1658	166	78	88,6%
0181	112	-54	-32,5%
0228	37	-75	-67,0%
1299	64	27	73,0%
Promedio 3 primeras muestras=			81,0%

Fuente: Autor

Evaluación correlacional de datos. Por medio de los gráficos de dispersión de Excel, se grafica una tendencia de parámetros que mantienen una relación directa entre sus comportamientos como se muestra en los siguientes casos, además se obtiene la

ecuación de la tendencia con un coeficiente de determinación (R), lo más ajustado al modelo de los datos.

- *BN en función de la Viscosidad.* Debido a la influencia que puede presentar el aceite en el aumento de viscosidad al ser contaminado por residuos de la combustión, se lo relaciona en el presente estudio en función del BN, dando como resultado una tendencia de grado 2 y un coeficiente R de 0,53 a su curva de dispersión de datos.

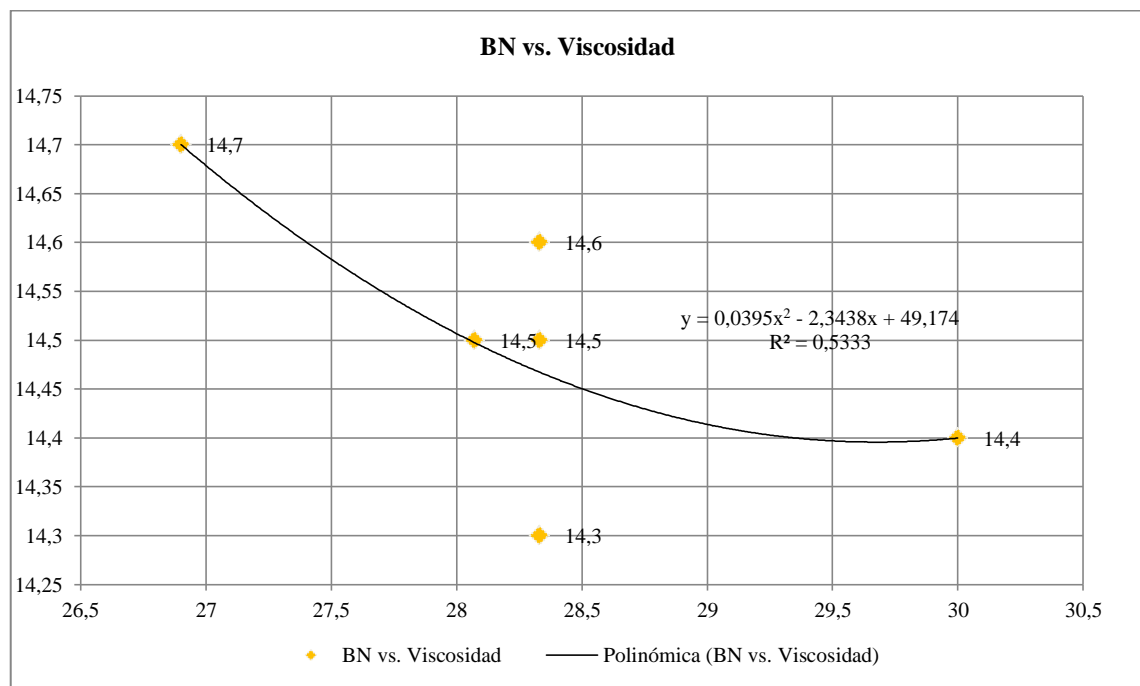


Figura 23. Dispersión de la correlación entre el BN y la viscosidad
Fuente: Autor

Los resultados de simular la proyección de datos con la ecuación obtenida de la regresión polinomial, son inversamente proporcionales, es decir, mientras la magnitud del BN disminuye, la viscosidad aumenta, siendo este el comportamiento esperado de la muestra.

Tabla 27. Resultados de la viscosidad con 11 series del BN, de 20 a 30 mg de KOH/g

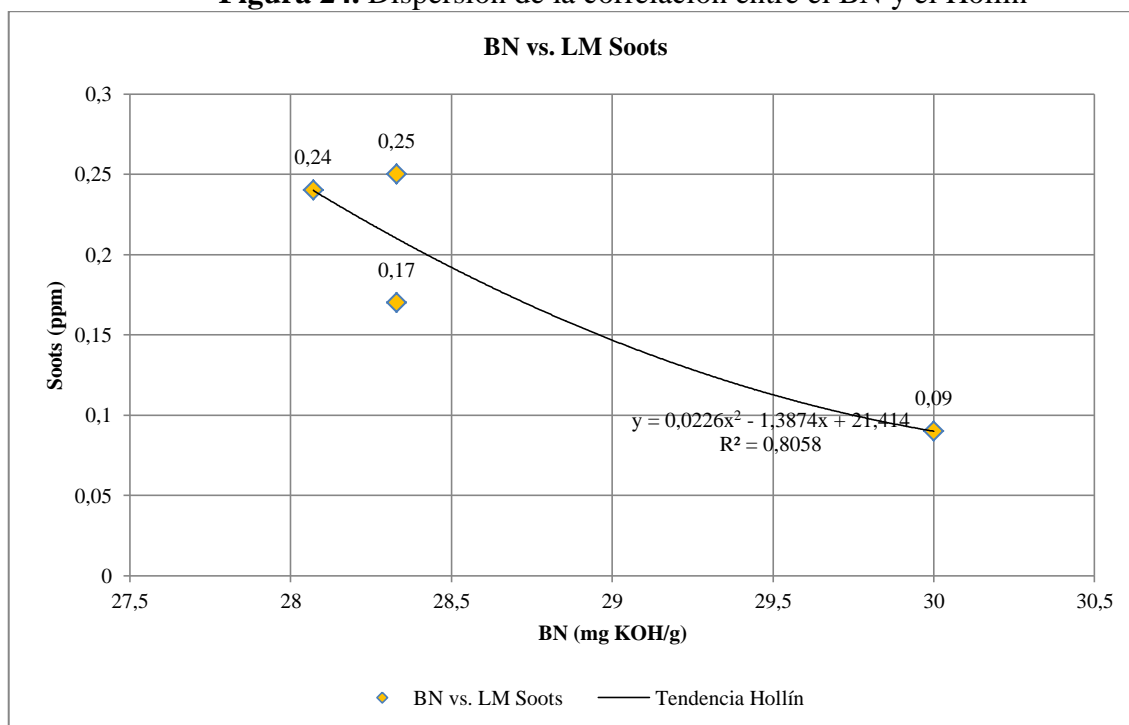
Serie	Valor BN	Resultado
Visc-0	20	18,09
Visc-1	21	17,37
Visc-2	22	16,73

Visc-3	23	16,16
Visc-4	24	15,67
Visc-5	25	15,26
Visc-6	26	14,94
Visc-7	27	14,68
Visc-8	28	14,51
Visc-9	29	14,42
Visc-10	30	14,41

Fuente: Autor

- *BN en función de concentración de Hollín.* La curva que relaciona al BN con el hollín es similar a la anterior correspondiente a la viscosidad, por lo cual se podría confirmar la hipótesis antes descrita, vinculando los residuos de la combustión con el incremento de la viscosidad y la disminución del BN.

Figura 24. Dispersión de la correlación entre el BN y el Hollín



Fuente: Autor

La curva obtenida de la dispersión de datos da como resultado una regresión polinomial con un coeficiente $R=0,80$.

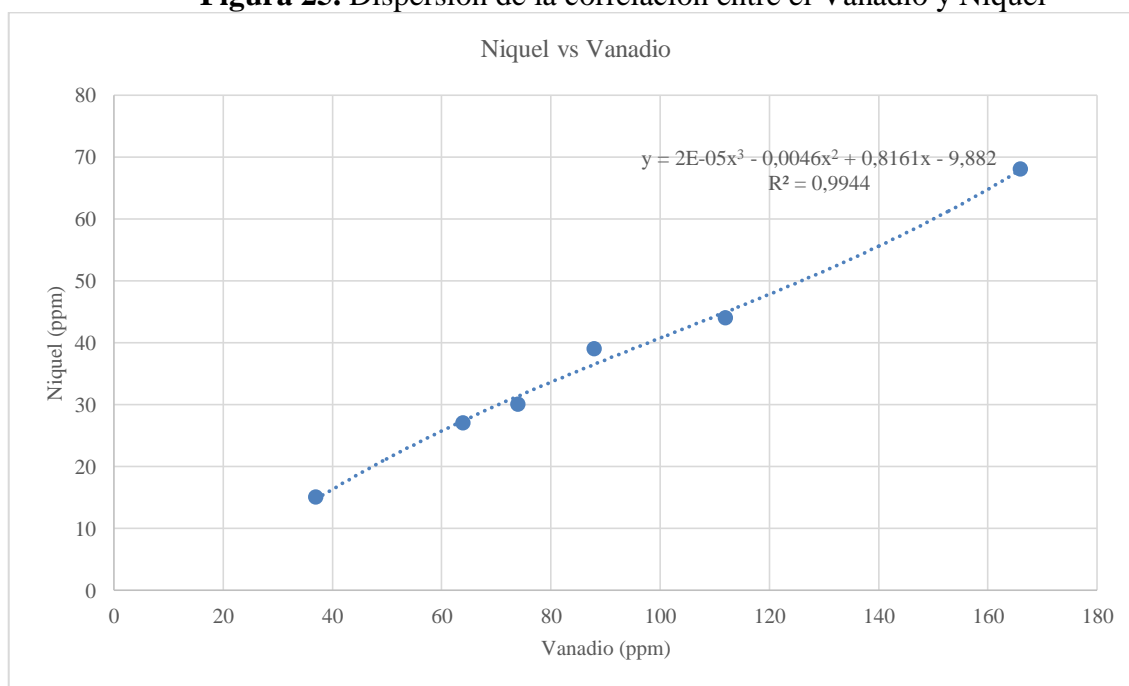
Tabla 28. Resultados de Hollín con 11 series del BN, de 20 a 30 mg de KOH/g

Serie	BN	Resultado Hollín
Hollín-0	20	2,706
Hollín-1	21	2,2452
Hollín-2	22	1,8296
Hollín-3	23	1,4592
Hollín-4	24	1,134
Hollín-5	25	0,854
Hollín-6	26	0,6192
Hollín-7	27	0,4296
Hollín-8	28	0,2852
Hollín-9	29	0,186
Hollín-10	30	0,132

Fuente: Autor

- *BN en función de concentración de Hollín.* Para comprobar lo mencionado en el método incremental, respecto al comportamiento del níquel y el vanadio, se realizó la siguiente curva, encontrando ambos parámetros directamente proporcionales.

Figura 25. Dispersión de la correlación entre el Vanadio y Níquel



Fuente: Autor

Como resultado de la dispersión de los datos del níquel en función del vanadio se obtuvo una curva polinomial de tercer grado, con un ajuste correcto de $R=0,99$, obteniendo la siguiente proyección de datos:

Tabla 29. Resultados del níquel con 11 series de Vanadio de 40 a 240 mg

Serie	Vanadio	Resultado Níquel
Níquel-0	40	16,682
Níquel-1	60	26,844
Níquel-2	80	36,206
Níquel-3	100	45,728
Níquel-4	120	56,37
Níquel-5	140	69,092
Níquel-6	160	84,854
Níquel-7	180	104,616
Níquel-8	200	129,338
Níquel-9	220	159,98
Níquel-10	240	197,502

Fuente: Autor

3.1.5 Análisis causa raíz

Análisis causa raíz (RCA por sus siglas en inglés), es un proceso diseñado para su uso en investigar y organizar la causa raíz de los eventos con seguridad, salud, ambiente, calidad, confiabilidad e impactos en la producción. El término “evento” es usado para generalmente identificar ocurrencias que producen o tienen el potencial para producir estos tipos de consecuencias (Rooney, y otros).

Para el análisis causa raíz se utilizó la metodología Apollo que gestiona el proceso por medio del software RealityCharting®, los procesos a seguir son:

Definición del problema. En la definición del problema se especifica los criterios o requisitos que sirven para identificar el problema, definiendo las interrogantes:

- *Que.* Debe ser definida como el efecto primario o el punto de partida del análisis.

- *Cuando.* Lugar en el tiempo en el cual se desenvuelve la investigación o el incidente.
- *Donde.* Lugar en donde se presenta el evento.
- *Relevancia.* La importancia de la investigación.

What:	Degradación de propiedades del aceite
When:	2013
Date:	2013
Time:	12 meses
Relative When:	Durante la operación de la máquina operando con combustible petróleo crudo
Where:	Planta de Generación
System:	Lubricación
Equipment:	Motor Wärtsilä V32
Significance:	Costo de operación
Safety:	No
Environment:	No
Revenue:	Prolongación de 1000 horas del intervalo
Cost:	
Frequency:	+1000 horas operativas

Figura 26. Captura del ingreso de la definición del problema

Fuente: Realitycharting

- Identificación de causas y efectos por medio de un Realitychart. La identificación se realiza por medio de los efectos y las causas que puedan producirse, como condición de cada efecto se tiene dos causas producidas por al menos una acción y una condición.

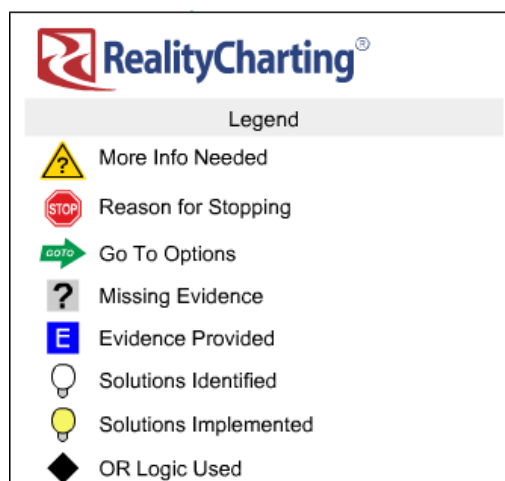


Figura 27. Leyenda del gráfico Realitycharting:

Fuente: Realitycharting

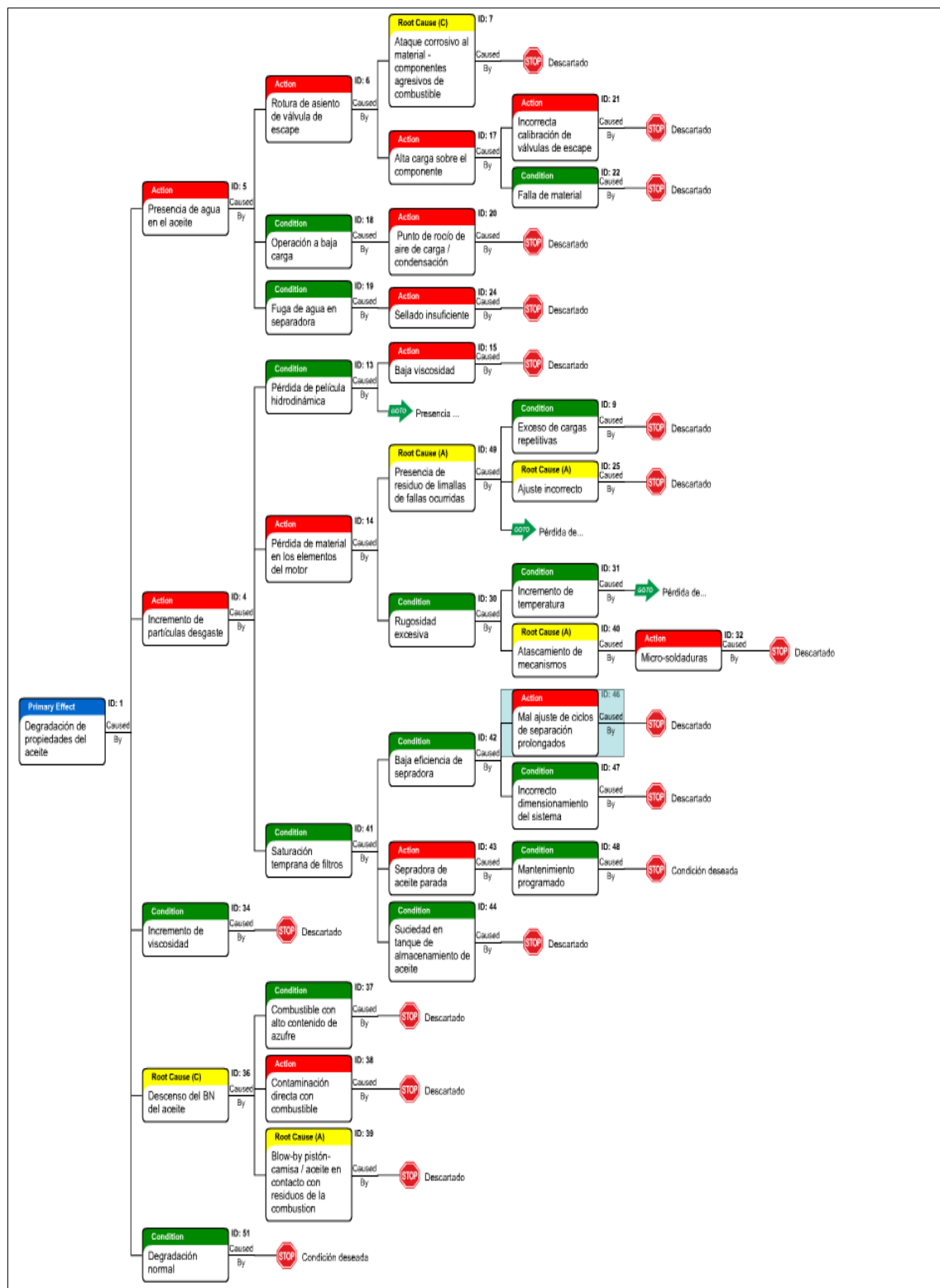


Figura 28. Vista compacta extraída del Realitycharting de la degradación de las propiedades del aceite

Fuente: Autor

- *Esquema general de Realitychart.* Presentación general de las causas e identificación del tipo de causas de acuerdo a: condición, acción o causa raíz.

Tabla 30 Esquema general de Realitycharting, causas y tipos de causas

ID	Tipo de causa	Causas
1		1.0 Degradación de propiedades del aceite
5	Acción	1.1 Presencia de agua en el aceite
6	Acción	1.1.1 Rotura de asiento de válvula de escape
7	Causa raíz (C)	1.1.1.1 Ataque corrosivo al material–componentes de combustible
17	Acción	1.1.1.2 Alta carga sobre el componente
21	Acción	1.1.1.2.1 Incorrecta calibración de válvulas de escape
22	Condición	1.1.1.2.2 Falla de material
18	Condición	1.1.2 Operación a baja carga
20	Acción	1.1.2.1 Punto de rocío de aire de carga / condensación
19	Condición	1.1.3 Fuga de agua en separadora
24	Acción	1.1.3.1 Sellado insuficiente
4	Acción	1.2 Incremento de partículas desgaste
13	Condición	1.2.1 Pérdida de película hidrodinámica
15	Acción	1.2.1.1 Baja viscosidad
		1.2.1.2 GOTO: Presencia de agua en el aceite
14	Acción	1.2.2 Pérdida de material en los elementos del motor
49	Causa raíz (A)	1.2.2.1 Presencia de residuo de limallas de fallas ocurridas
9	Condición	1.2.2.1.1 Exceso de cargas repetitivas
25	Causa raíz (A)	1.2.2.1.2 Ajuste incorrecto
		1.2.2.1.3 GOTO: Pérdida de película hidrodinámica
30	Condición	1.2.2.2 Rugosidad excesiva
31	Condición	1.2.2.2.1 Incremento de temperatura
		1.2.2.2.1.1 GOTO: Pérdida de película hidrodinámica
40	Causa raíz (A)	1.2.2.2.2 Atascamiento de mecanismos
32	Acción	1.2.2.2.2.1 Micro-soldaduras
41	Condición	1.2.3 Saturación temprana de filtros
42	Condición	1.2.3.1 Baja eficiencia de sepradora
46	Acción	1.2.3.1.1 Mal ajuste de ciclos de separación prolongados
47	Condición	1.2.3.1.2 Incorrecto dimensionamiento del sistema
43	Acción	1.2.3.2 Separadora de aceite parada
48	Condición	1.2.3.2.1 Mantenimiento programado
44	Condición	1.2.3.3 Suciedad en tanque de almacenamiento de aceite
34	Condición	1.3 Incremento de viscosidad
36	Causa raíz (C)	1.4 Descenso del BN del aceite
37	Condición	1.4.1 Combustible con alto contenido de azufre

38	Acción	1.4.2 Contaminación directa con combustible
39	Causa raíz (A)	1.4.3 Blow-by pistón-camisa / aceite en contacto con residuos de la combustion
51	Condición	1.5 Degradación normal

Reporte de posibles soluciones:

Tabla 31. Lista de soluciones planteadas a causas raíz

Root Causes	Solutions
Ajuste incorrecto	Revisar procedimiento, tolerancias y ajustes de acuerdo al manual de instrucciones
Atascamiento de mecanismos	Lubricar, revisar holguras, alineación y estado de componentes
Ataque corrosivo al material - componentes agresivos de combustible	Realizar análisis del combustible en caso de notar un cambio en las propiedades o de lote
Presencia de residuo de limallas de fallas ocurridas	Revisar filtros centrifugos, finos, automáticos durante su mantenimiento
Blow-by pistón-camisa / aceite en contacto con residuos de la combustion	Revisar estanqueidad de cilindros
Descenso del BN del aceite	Realizar análisis de aceite cada 500 hrs

IV. Notes

1. Realitychart Status: The Realitychart is in draft form and the Incident Report has not been finalized.
2. Rules Check Status: Some causes have been purposefully left off the Realitychart.
3. Rules Check Status: Conjunctions Resolved.

CAPÍTULO IV

4. COMPROBACIÓN Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El procesamiento y análisis de pruebas fueron realizados en base a informes emitidos de laboratorio (ver Anexo C). La comprobación y conclusiones de los resultados obtenidos se estructuran en:

- Pruebas de las propiedades físicas y concentración de metales del aceite, realizando una comparación con las horas de operación en el motor.
- Análisis del agua de refrigeración y combustible los cuales también pueden dar lugar a la formación de corrosión dentro de la máquina y reducción de la vida útil del aceite lubricante.

4.1 Propiedades físicas del aceite

Número Básico. El aceite posee un número de basicidad nominal de 30 mg de KOH/g, y su deflexión pertenece a la formación de ácidos producidos principalmente por el combustible.

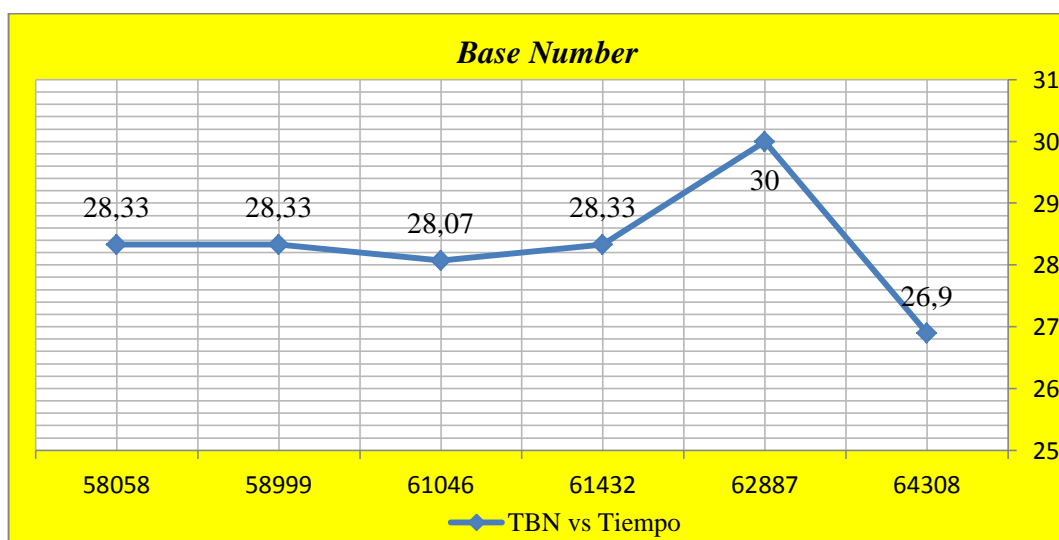


Figura 29. Comportamiento del BN en función del tiempo
Fuente: Autor

La capacidad alcalina para reducir la formación de ácidos dentro de la máquina, se mantiene en niveles apropiados, seguros para la operación, (ver Figura 33).

Como conclusión tenemos que el número de basicidad del aceite se mantiene dentro de límites permisibles, sin embargo en la muestra N° 0228, se observa un incremento del mismo, siendo las posibles causas un incremento en el paquete de este aditivo o un posible error en el reporte de laboratorio.

4.2 Análisis espectro-químico.

En el estudio realizado a los resultados de estas pruebas, se pudo identificar el estado del aceite en cuanto al estado del contenido de partículas de desgaste, agentes contaminantes externos y su contenido de aditivos en cada muestra tomada, como complementación del análisis estadístico realizado anteriormente.

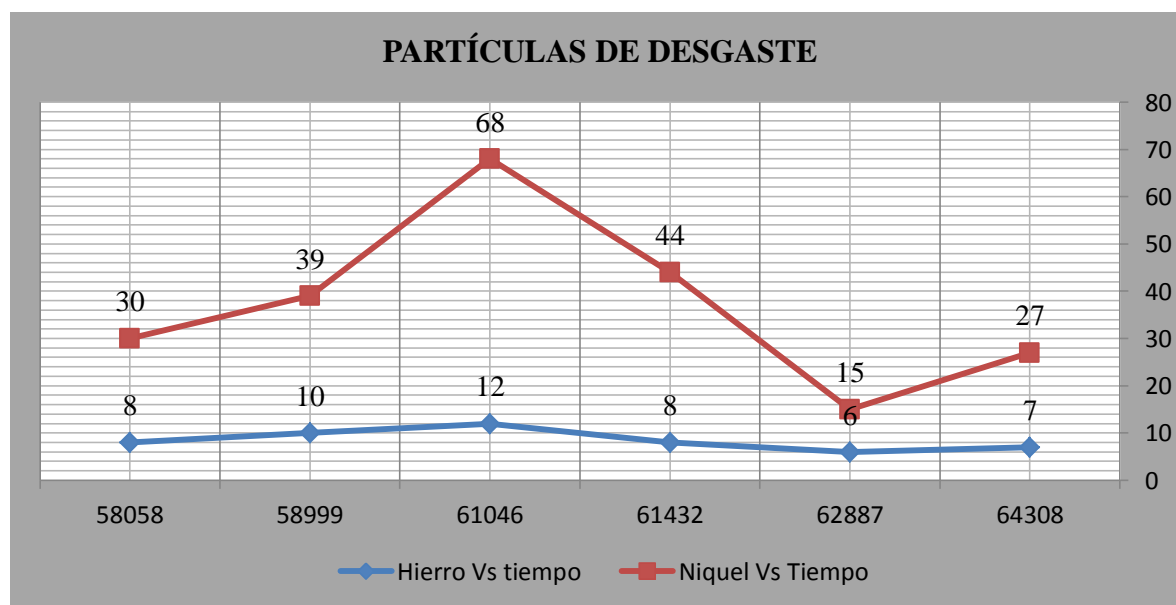


Figura 30. Comportamiento de las partículas de desgaste en función del tiempo

Fuente: Autor

Hierro. Los niveles se encuentran variando dentro de valores permisibles, indicando que existe un bajo porcentaje de desgaste en componentes que contienen hierro en su composición.

Cromo. Los niveles están dentro de rango normal sin embargo se observa un mínimo incremento, poco considerable.

Aluminio. Se observa un contenido despreciable en el contenido del mismo.

Plomo. No se observa desgaste.

Cobre. Se observa que en las dos primeras muestras llega al límite permisible, pero no alcanza valores de alerta, el porcentaje desgaste en componentes de cobre es bajo.

Estaño. Los valores son bajos para considerar algún tipo de desgaste pronunciado.

En conclusión, la película de aceite lubricante se encuentra en regímenes de operación aceptables, manteniendo así el nivel de desgaste de la máquina en relación a los intervalos de mantenimiento establecidos, (ver Figura 34).

- *Agentes contaminantes externos y contenidos de aditivos.* Pueden provenir de factores externos como el combustible, polvo, otros tipos de insolubles (ver Figura 35).

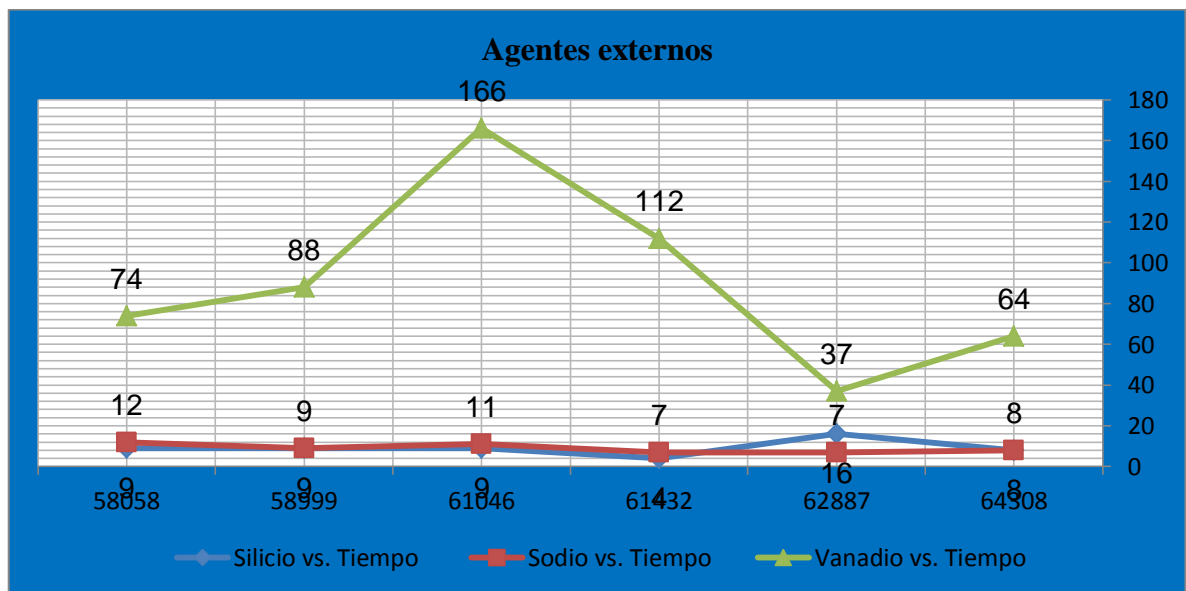


Figura 31. Comportamiento de los agentes contaminantes en función del tiempo

Fuente: Autor

Silicio. Presente como contaminación, no representa una amenaza durante la operación del aceite.

Sodio. El contenido de Sodio es bajo en función a lo permisible.

Fósforo. Como aditivo, se encuentra dentro de parámetros normales.

Zinc. Se encuentra dentro de los límites permisibles característicos del aceite lubricante.

Por lo que se deduce que las condiciones tanto ambientales como de las posibles de contaminación (ductos de aire de carga, enfriadores de aire de carga, *blow-by* en camisa y rines de pistón, características de la inyección de combustible, etc.) no representan una amenaza durante el ciclo de vida normal del aceite lubricante.

Pruebas adicionales. Adicionalmente se monitorea la condición de la máquina mediante ensayos de presiones pico de cilindros y análisis del agua de enfriamiento de los sistemas de LT y HT, los mismos que constan en el Anexo C.

Según análisis de combustible (ver Anexo D), se observa que los valores de azufre están dentro de valores permisibles para la operación 0.66 y 0.89 g%. Como observación a la gravedad específica, que se encuentra en 0.8681 y 0.8855 por lo que se debe tomar en cuenta la Figura 36, puesto que los hidrocarburos aromáticos poseen una estructura constituida principalmente por anillos de benceno el cual posee una gravedad específica de 0.8844.

WATSON CHARACTERIZATION FACTORS FOR SELECTED COMPOUNDS						
Series	Compound	Formula	Boiling Point Temperature (°R)	Molecular Weight	Specific Gravity	Watson Characterization Factor
Paraffins	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	615.4	86.178	0.6640	12.8
	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	600.1	86.178	0.6579	12.8
	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	668.8	100.205	0.6882	12.7
Naphthenes	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	637.0	84.162	0.7834	11.0
	Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	673.4	98.189	0.7740	11.3
Aromatics	Benzene	C ₆ H ₆	635.8	78.114	0.8844	9.7
	Toluene	C ₇ H ₈	690.8	92.141	0.8718	10.1

Figura 32. Clasificación de los petróleos crudos por Factor Watson

Fuente: http://petrowiki.org/Crude_oil_characterization

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se revisó las funciones del motor, a su vez los ciclos de trabajo y parámetros operativos del mismo, permitiendo reconocer así sus características y su modo de funcionamiento.

Se resaltó las fortalezas del mantenimiento proactivo sobre las otras metodologías de mantenimiento.

Se reconoció los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en el motor.

Se calculó parámetros característicos que gobiernan el sistema de lubricación, tales como la multiplicidad de circulación del aceite del motor, la capacidad específica del sistema de lubricación, el suministro específico de la bomba de aceite y la separación de aceite lubricante.

Se estableció un proceso que facilite la identificación de un requerimiento de un análisis de aceite, mediante la identificación del tipo de pruebas, y factores a considerar al realizar la toma de muestras y el análisis de los resultados.

Se consideró la importancia de realizar una investigación de la principal causa raíz que afecta la vida útil de la máquina, observando que la amenaza de mayor potencial se encuentra en la formación de corrosión y desgaste, razón por la cual se direccionó el estudio en el análisis del aceite lubricante usado en el motor.

Se realizó pruebas que ayudaron a identificar las fuentes de contaminación y degradación en el aceite lubricante, permitiéndonos conocer la condición del mismo para la operación. Obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se realizó una corrección en la muestra N° 0228, reemplazando por el valor nominal del BN característico del aceite *Shell Argina* T40, debido a un error de laboratorio, ya que en todas las ocasiones se colocó el mismo tipo de aceite. La reserva alcalina en el aceite (BN) posee los niveles adecuados para neutralizar la

- formación de ácidos, y el porcentaje de azufre en el combustible también se encuentra dentro de valores aconsejables de operación.
- Se puede extender el intervalo hasta las 1000 horas más de operación, ya que se observa según muestras N° 1132 y 1610, no existe una precipitación pronunciada de los parámetros físicos, partículas de desgaste y aditivos. Manteniendo la baja observación los parámetros tomando análisis del aceite cada 500 a 1000 horas operativas.
- La adición del aceite debe hacerse agregando el 10% para cada ocasión para no alterar el balance del aceite usado, como se menciona en el manual de instrucciones del motor en la sección: 02.2.3 *Maintenance and control of the lubricating oil*. Lo cual se hace por medio del control de consumo específico de aceite en la máquina.
- En general, el análisis realizado en base a los valores obtenidos en los resultados de las diferentes pruebas de los laboratorios y en tendencias realizadas con estos parámetros, nos muestran que el control del aceite lubricante se mantiene en un estado saludable para la máquina y por ende la seguridad de la operación.

5.2 Recomendaciones

Para llevar una tendencia más eficiente se recomienda reportar los valores en cifras y no valores referenciales utilizando límites inferiores a una medida.

En caso de presenciar una elevación en el contenido de agua en aceite:

- Tratar de no trabajar a cargas bajas, ya que podría dar lugar a la acumulación de puntos fríos en la máquina que causarían la formación de condensados.
- Observar el consumo de agua tanto en el circuito que refrigera al motor como en el circuito que refrigera aire de carga y enfriador de elementos auxiliares. Esto se puede hacer por medio de medición de niveles en los tanques de expansión.

- En caso de poseer un dispositivo detector de neblinas monitorear en presencia de contenido de agua.

Realizar un análisis comprensivo de combustible según lo recomendado en el Manual de la ASTM: Significant of Tests for Petroleum Products, en la cual se menciona que se debe llevar a cabo este tipo de análisis cuando un nuevo lote de crudo entre en la línea de suministro, o el ensayo de inspección indique cambios significativos se han producido en la composición del crudo suministrado (ASTM International, 2010). Esto con el propósito de confirmar la caracterización y propiedades del combustible utilizado en la operación (tratamiento y utilización). Como sugerencia, se recomienda normalizar las pruebas de combustibles a lo sugerido en manual de instrucciones de motor (Sección: *02.1.3 Maximum limits of fuel characteristics*).

BIBLIOGRAFÍA

ANALYSTS, Inc., *Basics of oil analysis*. 2008. pp. 10-13.

ASTM International. Significance of Tests for Petroleum Products. [en línea] Salvatore J. Rand. *Significance of Tests for Petroleum Products, 8th Edition*. Montgomery, Pensilvania, EEUU: ASTM International. 2010. pp. 106.

CIMAC. *PAPER N°21: Oil stress investigations in Shell's medium speed laboratory engines*. Kyoto: CIMAC. 2004.

FERRER GIMÉNEZ, Carlos & AMIGÓ BORRÁS, Vicente. Tipos de lubricación líquida. Carlos Ferrer Giménez y Vicente Amigó Borrás. *Tecnología de materiales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2003. pp. 164.

GONZÁLES, Jorge Luis. Comportamiento a temperaturas elevadas. Jorge Luis González. *Metalurgia Mecánica*. México, D.F.: LIMUSA, S.A. 2003. pp. 221.

HADFIELD, M & WANG, Y. 2003. Combustion Engine Tribology. Professional Engineering Publishing. *2nd International Conference on Tribology in Environmental Desing, The Characterisitcs of Interfaces Surfaces - A Key Factor in Sustainable and Economis Products*. Trowbridge, Wiltshire, UK: Cromwell Press. 2003. pp. 74.

Slideshare. *Mantenimiento Industrial* [en línea]. López Pérez, Jimmy A. [Consulta: 13 marzo 2013]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/jimmy1alb/mantenimiento-industrial-unidad-i-17151495>.

QUÍMICAWEB. *Molibdeno* [en línea]. [Consulta: 23 junio 2013]. Disponible en: <http://www.quimicaweb.net/tablapperiodica/paginas/molibdeno.htm>

Scrib. *Libro de Mantenimiento Industrial* [en línea]. [Consulta: 10 agosto 2013]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/18358130/Libro-de-Mantenimiento-Industrial>.

SOLOMANTENIMIENTO. *Mantenimiento Preventivo* [en línea]. [Consulta: 05 noviembre 2013]. Disponible en: http://www.solomantenimiento.com/m_preventivo.htm.

TECHGNOSIS INTERNATIONAL S.A. Contaminación y pérdida: ¿Cuál es el efecto de los contaminantes en la productividad de su empresa?. José Páramo. *Tribología centrada en confiabilidad, Preparación para Certificación Categoría I de la Norma ISO 18436-4*. Guanajuato, México: Techgnosis Internacional S.A. 2013, pp. 163-173.

TORMOS, Bernardo. *Tribología en motores Diesel: Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Barcelona, España: REVERTÉ. 2005. pp. 16.

MANTENIMIENTOMUNDIAL. *El Mantenimiento Proactivo como una herramienta para extender la vida de sus equipos* [en línea]. Gerardo Trujillo C. 2002. [Consulta: 09 mayo 2013]. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/lubproact.asp>.

WÄRTSILÄ DIESEL. Power Plants. *Handbook for Mechanical Systems*. 2013. pp. 1.

WÄRTSILÄ. 2002. Manual de instrucciones del motor Wärtsilä Vasa 32. *Maintenance Schedule*. 2002. Sección. 04-4